

Полтавська державна аграрна академія  
Дніпровський державний аграрно-економічний університет  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

**ГАЛИЦЬКА МАРИНА АНАТОЛІВНА**

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

ДИСЕРТАЦІЯ

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

03.00.16 – екологія

на здобуття наукового ступеня

кандидата сільськогосподарських наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

---

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: Писаренко Павло Вікторович, доктор  
сільськогосподарських наук, професор, академік Інженерної академії України

Полтава – 2021

## 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. – Полтавська державна аграрна академія, Полтава, 2021.

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. Використання біоенергетичних культур таких як Міскантус гігантський (*Miscanthus × giganteus*), та Просо прутоподібне (*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. 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 CO<sub>2</sub> 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 Міскантус гігантський (*Miscanthus × giganteus*), та Просо прутоподібне (*Panicum virgatum* L), який обумовлений довгостроковим вирощуванням цих культур, а також їх впливом на відновлення екосистемних функціями 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.

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 виконані такі завдання: 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; визначені закономірності варіювання емісії оксиду вуглецю та депонування вуглецю в насадженнях енергетичних культур; оцінена роль кліматичних чинників у варіюванні емісії оксиду вуглецю та у депонуванні вуглецю в ґрунті; встановлені закономірності формування продуктивності насаджень енергетичних культур; оцінено стійкість динаміки систем біоенергетичних культур.

Об'єктом дослідження є функціонування енергетичних культур Міскантусу гігантського (*Miscanthus × giganteus*) та Проса прутоподібного (*Panicum virgatum* L) як фактор депонування вуглецю в ґрунті. Предметом вивчення є агроекологічні закономірності формування продуктивності енергетичних культур, а також емісії оксиду вуглецю та депонування вуглецю в ґрунті. В роботі застосовувались наступні методи дослідження. Теоретичного аналізу – для узагальнення результатів наукових досліджень закордонних та вітчизняних в науковців відповідно до мети та об'єкту досліджень. Стаціонарного польового дослідження та визначення основних ґрунтових та агрохімічних показників, у тому числі емісії CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> та секвестрації Сорг в ґрунті.

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 місакнтусу та свічграсу. Оцінена взаємодія агроекологічних факторів у впливі на емісію оксиду вуглецю та депонування вуглецю в ґрунті. Обґрунтоване значення насаджень енергетичних культур як фактору депонування вуглецю в ґрунті. Удосконалено процедуру в 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.

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. Також рекомендовано під час висвітлення 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. 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.

У роботі встановлено, що середня річна температура за період досліджень варіювала в межах від 9,3 до 10,8°C. Сумарна кількість опадів за рік варіювала у діапазоні від 402.9 до 798.9 мм. Випадіння максимальної кількості опадів протягом року є 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. Доведено, що культура, глибина шару ґрунту, рік та вік вегетації визначають 95 % варіювання емісії оксиду вуглецю ґрунтом, 60 % варіювання депонування карбону в ґрунті. Культура є статистично вірогідним предиктором екологічних процесів та здатна пояснити 49.0 % варіювання швидкості емісії оксиду вуглецю, 8.5 % варіювання депонування карбону в ґрунті. Ґрунт під сіножаттю характеризується найменшим рівнем емісії оксиду вуглецю ( $74.70 \pm 0.90$  мг/кг/год) та найменшим рівнем депонування вуглецю ( $1.87 \pm 0.017$  %). Під насадженням світчграсу емісія оксиду вуглецю зростає на 83.3 % порівняно з контролем, а під міскантусом зростає на 113.3 % порівняно з контролем. Під світчграсом депонування карбону в ґрунті зростає на 7.1 % порівняно з контролем, а під міскантусом зростає на 15.4 % порівняно з контролем. Одержані підтвердження того, що 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 міскантусу, дещо менш чутливою є емісія з насаджень світчграсу. Цілинний покрив є найбільш резистентним до варіювання кліматичних умов. Емісія оксиду вуглецю зростає з віком вегетаційного

покриву, що може бути пояснене накопиченням біомаси в ґрунті більш старих за віком плантацій. Найбільше з віком зростає емісія оксиду вуглецю під насадженнями міскантусу. 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 міскантусу. Показано, що 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 міскантусу, а найменш вираженими для сіножаті. Показано, що насадження світчграсу перевищує контрольну продуктивність у 14.2 рази, а міскантус – у 18.9 разів. Відповідно, міскантус є більш продуктивним за світчграсу в 1.3 рази. Культура, рік та вік вегетації визначають 60 % варіювання надземної продукції енергетичних культур. Відмінності у фітомасі між роками, які становлять загальний тренд для усіх типів рослинного покриву, визначаються особливостями забезпечення водними ресурсами кожного року. Чутливим предиктором міжрічних відмінностей 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. Вперше встановлено, що 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 ендogenousні 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. Показано, що 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.

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

## 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. – Poltava State Agrarian Academy, Poltava, 2021.

Combating and preventing climate change is a system of measures aimed at reducing greenhouse gas emissions and curbing the growth of the average global temperature of the Earth's atmosphere. The list of such measures is defined by international agreements - the UN Framework Convention on Climate Change, the Kyoto Protocol to it, the Paris Climate Agreement, and at the national level - the Concept of state policy implementation in the field of climate change for the period up to 2030. The use of bioenergy crops such as *Miscanthus × giganteus*, and Millet (*Panicum virgatum* L) is an attractive alternative to renewable sources of traditional fossil fuels can offset the growing demand for energy while mitigating the effects of the energy crisis, such as climate change and greenhouse gas emissions. These crops are also seen as an environmentally friendly solution for growing them on polluted, marginal and unproductive agricultural soils. Biomass as a renewable energy source is becoming increasingly common around the world to reduce greenhouse gas emissions. Among the environmental impacts of bioenergy crops on the environment, changes in organic carbon stocks are of particular interest because they are related to

carbon dioxide emission and deposition. Recently, the assessment of CO<sub>2</sub> emissions from soils is of particular relevance, as it is closely dependent on progressing global warming. Biomass as a renewable energy source is becoming increasingly common worldwide to reduce greenhouse gas emissions. Among the environmental impacts of bioenergy crops on the environment, changes in organic carbon stocks are of particular interest because they are related to carbon dioxide emissions and deposition.

The aim of the work is to establish the regularities of functioning of perennial systems of bioenergy crops *Miscanthus giganteus* (*Miscanthus* × *giganteus*) and Millet (*Panicum virgatum* L) as factors of carbon deposition in soil. For realization of the specified purpose the following problems are executed: ecological and climatic features in which perennial systems of bioenergetic cultures function are established; the role of a crop, depth of a layer of soil, year and age of vegetation in variation of carbon oxide emission by soil and carbon deposit in soil are estimated; regularities of variation of carbon oxide emission and carbon deposit in plantations of energy crops are determined; the role of climatic factors in variation of carbon oxide emission and in deposit of carbon u

The object of the study is the functioning of energy crops *Miscanthus giganteus* (*Miscanthus* × *giganteus*) and Millet (*Panicum virgatum* L) as a factor in soil carbon deposition. The subject of the study is agroecological regularities of the formation of energy crop productivity, as well as carbon monoxide emission and carbon sequestration in the soil. The following research methods were used in the work. Theoretical analysis - to summarize the results of scientific research foreign and domestic in scientific accordance with the objectives and the object of research. Stationary field experiment and determining the main soil and agrochemical indicators, including CO<sub>2</sub> emissions and organic carbon deposition. Analysis of variance (multiple analysis of variance, multiple linear models) - to assess the degree of influence of each of the studied factors on carbon emission and deposition processes, correlation and regression analysis - to test hypotheses about the statistical properties of causal ecological relationships; mathematical-statistical and



mathematical modeling - to assess the reliability of the results, identify correlations, assess the balance of CO<sub>2</sub> concentration and sequestration of sorghum in the soil.

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. Research results form a theoretical basis for calculating and accounting the greenhouse gas balance at the National Plant Gas Emissions Accounting Centre in Ukraine, During the inventory of greenhouse gas emissions associated with land-use change. It is also recommended to address climate issues in state planning and strategic environmental assessment under the Ukraine Law on Strategic environmental assessment." Received results are convincing that the planting of energy crops on the marginal lands is carried out by ecosystem services, It is an important tool for depleting carbon dioxide in the ground. Creating energy cultures is one way to solve the problem of increasing carbon dioxide concentrations in the atmosphere, which is most suitable in the industrial regions of Ukraine with a high marginal area.

It was found that the average annual temperature ranged from 9.3 °C to 10.8 °C over the period of the study. The average decline per year ranged from 402.9 mm to 798.9 mm. The fall in the maximum number of declines over the year is very uneven and repeated year by year. Over the period of study, the decade without collapse was observed at 10.6 percent of the time. The conditions were close to the optimum value for energy crops by hydrothermal coefficient in 2016, 2018 and 2020 (GTK close to 1). The moisture deficit was observed in 2017 and 2019. Culture, depth of soil, year

and age of vegetation have been shown to account for 95% variation in carbon dioxide emissions from soil, 60% variation in carbon deposition from soil. Culture is statistically likely to cause ecological processes and can explain 49.0% variation in the rate of carbon dioxide emissions, 8.5% variation in carbon depletion on the ground. The soil is characterised by the lowest level of carbon dioxide ( $74.70 \pm 0.90$   $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{h}$ ) and the lowest level of carbon deposition ( $1.87 \pm 0.017\%$ ). When it's light-emitted, carbon dioxide increases by 83.3% compared to control, and it increases by 113.3% compared to control. Under the light bulb, carbon deposition in the soil increases by 7.1% compared to control, and under the mistrust increases by 15.4% compared to control. It is confirmed that the annual variation in carbon dioxide emission intensity is conditioned at a temperature of several years. The rise in average annual temperature causes an overall increase in carbon dioxide emissions from soil under all types of plant cover. The most sensitive to the average temperature fluctuation is carbon dioxide emissions under the moisture content, slightly less sensitive to the light grain emissions. The entire roof is the most resilient to climate change. Carbon dioxide emissions increase with age of vegetation cover, which can be explained by accumulation of biomass in soil older than plants. The older you get, the more you get, the more you get, the more you get, the more you get, the more you get, the more you get, the more you get, the more you get, the more you get, the more you get, the more you get. The patterns of carbon change in the soil associated with the astronomical year do not depend on the vegetation age. The carbon content in the soil grows along with the vegetation age of the miccantus plants. It's shown that the depth of the ground layer can explain 26.7 percent of the variation in carbon dioxide emissions and is the most significant factor, which can explain 53.4% of the variation in carbon deposition. The deeper the carbon dioxide is going down. The differences in the intensity of carbon dioxide emissions between soil layers can be explained by temperature gradient, changes in oxygen availability and organic matter content. Differences between the ground layers by emotional capacity increase with age of planting and are most pronounced for the planting of miccantus and least pronounced for synagogue. It has been shown that lighting exceeds the control productivity by

14.2 times and the miccantus by 18.9 times. Accordingly, miccantus is more productive than lightning 1.3 times. Culture, year and age of vegetation account for 60% of the variation in the production of energy crops. Differences in phytosis between the years that represent the overall trend for all types of plant cover are determined by the water supply characteristics each year. The sensitive cause of gender differences is the rate of growth of cumulative declines in the process of active vegetation between April and the end of June. As the plant population ages, its phytosis grows. The response of energy cultures to environmental factors is similar between different cultures. It was first established that the dynamics of change in the time of carbon dioxide emissions, carbon content and groundwater phytosis are determined by the current state of the system. The synthesized system has an equilibrium that is not stable. The lack of stability is due to weak endogenous mechanisms to regulate carbon dioxide emissions in the ecosystem of this type. The system that forms in the saturation of the luminous beam and the locality has a static state that is stable and reactive. It has been shown that the main mechanism to sustain the stability of the light-grain and miccantus systems is to stabilize the impact of carbon dioxide emissions and extraterrestrial phytosis on carbon deposition in the soil. The predicted steady-state of carbon deposition is higher than that observed, indicating a steady trend towards increasing carbon deposition by saturation of light grain and locality.

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

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ВИСВІТЛЕНО

### ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ 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>

*(Проведенні польових досліджень, обчислення результатів, формування висновків, підготовки матеріалу до друку)*

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

### **Публікації у наукових фахових виданнях України**

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

4. Колєснікова Л. А., **Галицька М. А.**, Піщаленко М. А., Бараболя О. В., Чубук Д. І., & Литвишко О. А. (2019). Реакція сільськогосподарських рослин на забруднення ґрунту нафтою. Вісник Полтавської державної аграрної академії, (4), 100-107. <https://doi.org/10.31210/visnyk2019.04.12> *(Проведенні польових досліджень, обчислення результатів, формування висновків, підготовки матеріалу до друку)*

5. **Галицька, М. А.** Гуміфікаційно-мінералізаційні процеси як показник акумуляції карбону в ґрунтах [Текст] / **М. А. Галицька**, П. В. Писаренко, М. А. Кулик // Таврійський науковий вісник : Сільськогосподарські науки. - Херсон : Вид. дім "Гельветика", 2018. - Вип.102. - С. 130-136 36 *(Опрацювання та аналіз наукової літератури, підготовка до друку)*

6. Taranenko, A. O., Kulyk, M. I., **Galytska, M. A.** & Taranenko, S. V (2020). Influence of different methods of switch-grass cultivation on soil organic matter dynamics and biomass productivity. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, (3), 135–149. doi: 10.31210/visnyk2020.03.15 *(Проведенні польових*

*досліджень, обчислення результатів, формування висновків, підготовки 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](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 / Оптимальні 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. 150 с. с 13-36 (*Опрацювання та аналіз наукової літератури, підготовка до друку*).

9. **М.А. Галицька**, М.І. Кулик, О.О. Горб 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. – П. : ТОВ НВП «Укрпромторгсервіс», 2017. – 326 с.С 216-226 (*Опрацювання та аналіз наукової літератури, підготовка до друку*).

10. **М.А. Галицька**, І.І. Жорник, А.В. Молчанова, 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. Яснооб. – П. : ТОВ НВП «Укрпром торгсервіс», 2017. – 326 с.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 / Кол. авторів; за заг. ред. П. М. Макаренка, О. В. Калініченка, В. І. Аранчій. Полтава : ПП “Астрія”, 2019. 603 с. 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. М. І. Кулик, І. І. Рожко, **М. А. Галицька**, Патент на корисну модель №125096 «Спосіб допосівної обробки насіння проса прутіподібного (*Panicum virgatum* L.)», винахідники власник: Полтавська державна аграрна академія. Від 25.04.2018

15. М. І. Кулик, **М. А. Галицька**, І. І. Рожко Авторський твір №76724 «Ботаніко-біологічні особливості та потенціал урожайності енергетичних культур», автори: , обсяг 20 с 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. – P. 49

17. **Галицька М.А.,** Лесшен Я. П. Оцінка життєвого циклу органічного вуглецю та азоту ґрунту при вирощуванні енергетичних культур // Матеріали II міжнародної науково-практичної інтернет - конференції "Ефективне функціонування екологічно-стабільних територій у контексті стратегії стійкого розвитку: агроекологічний, соціальний та економічний аспекти" – 28 листопада 2018, Полтава – 255 с., С. 52-55

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/ редкол.: В.А. Аранчій, П.В. Писаренко, С.В. Поспелов, О.В.Міщенко, М.М.Опара, В.М.Самородов.- Полтава: ПДАА, 2019.- 147 с.С 80-84

19. **Галицька М.А.,** Калініченко А. В. Зменшення викидів CO<sub>2</sub> шляхом системного застосування технології No-till в сільгоспвиробництві // Матеріали II міжнародної науково-практичної інтернет - конференції "Ефективне функціонування екологічно-стабільних територій у контексті стратегії стійкого розвитку: агроекологічний, соціальний та економічний аспекти" – 28 листопада 2018, Полтава – 255 с., С. 204-207.

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//Матеріали III міжнародної науково-практичної інтернет - конференції "Ефективне функціонування екологічно-стабільних територій у контексті стратегії стійкого розвитку: агроекологічний, соціальний та економічний аспекти" – 12 грудня 2019 року, Полтава – 255 с. С. 112-116

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. 477 с. с. 162-165

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. 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/>

23. **Галицька М.А.**, Кулик М.І., Колеснікова Л.А Інтенсивність асиміляції карбону при вирощуванні енергетичних культур в умовах Лісостепу України// Збірник матеріалів II Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічні проблеми навколишнього середовища та раціонального природокористування в контексті сталого розвитку» – 26 червня 2020, Полтава – 190с. С-127-131.



## ЗМІСТ

ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ І. ДЕПОНУВАЛЬНО-ЕМІСІЙНІ ПРОЦЕСИ КАРБОНУ В АГРОЕКОСИСТЕМАХ (аналітичний огляд літератури) .....	25
1.1. Фіторемедіаційні аспекти використання енергетичних культур в умовах України.....	25
1.2. Роль ґрунту в кругообігу карбону .....	39
1.3. Роль рослин у накопиченні ґрунтового органічного вуглецю та емісії вуглекислого газу .....	45
Розділ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	50
2.1. Ґрунтові умови регіону проведення досліджень.....	50
2.2. Кліматичні умови .....	53
2.3. Методика польових та лабораторних досліджень .....	54
2.4. Методика визначення інтенсивності виділення С-СО <sub>2</sub> ґрунту на ділянках при вирощуванні енергетичних культур .....	56
2.5. Методика визначення накопичення С <sub>орг</sub> при вирощуванні енергетичних культур .....	57
2.6. Методика визначення кількісних показників і урожайності біомаси енергетичних культур.....	59
РОЗДІЛ 3. ЕКОЛОГО-КЛІМАТИЧНІ РЕЖИМИ ВИРОЩУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР.....	61
3.1. Температурний режим .....	61
3.2. Режим опадів.....	63
3.3. Динаміка гідротермічного коефіцієнту .....	67
Висновки за розділом.....	69

РОЗДІЛ 4 ІНТЕНСИВНІСТЬ ЕМІСІЇ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ТИПУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР .....	71
4.1. Описові статистики емісії оксиду вуглецю .....	71
4.2. Порівняльний аналіз внеску різних факторів у варіювання емісії оксиду вуглецю з ґрунту .....	77
3.3. Оцінка взаємодії факторів у впливі на емісію оксиду вуглецю .....	82
Висновки за розділом.....	88
РОЗДІЛ 5 ДЕПОНУВАННЯ КАРБОНУ ПІД ЧАС ВИРОЩУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР.....	90
5.1. Описові статистики депонування карбону .....	90
5.2. Порівняльний аналіз внеску різних факторів у варіювання депонування карбону в ґрунті .....	95
3.3. Оцінка взаємодії факторів у впливі на емісію оксиду вуглецю .....	100
Висновки за розділом.....	107
РОЗДІЛ 6. АГРОЕКОЛОГІЧНИХ ФАКТОРИ ПРОДУКТИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР.....	108
6.1. Описові статистики динаміки продуктивності енергетичних культур .....	108
6.2. Порівняльний аналіз внеску різних факторів у варіювання надземної продукції енергетичних культур .....	111
6.3. Оцінка взаємодії факторів у впливі на надземну продуктивність енергетичних культур .....	116
РОЗДІЛ 7. СТІЙКІСТЬ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЕМІСІЇ ТА ДЕПОНУВАННЯ ВУГЛЕЦЮ В НАСАДЖЕННЯХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР.....	121
7.1. Динаміка процесів емісії та депонування вуглецю в контрольних умовах .....	121

7.2. Динаміка процесів емісії та депонування вуглецю в насадження світчграсу.....	126
7.3. Динаміка процесів емісії та депонування вуглецю в насадження міскантусу .....	129
Висновки за розділом.....	132
ВИСНОВКИ.....	134
РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ .....	137
ЛІТЕРАТУРА.....	138
ДОДАТОК 1 .....	166
ДОДАТОК 2.....	170

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** 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 прутоподібне (*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 [1–3]. 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 CO<sub>2</sub> 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 Міскантус гігантський (*Miscanthus × giganteus*), та Просо прутоподібне (*Panicum virgatum* L), який обумовлений довгостроковим вирощуванням цих культур, а також їх впливом на відновлення екосистемних функціями 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 відповідно до планів досліджень за завданнями: в рамках міжнародного Україно-нідерландського проекту Pellets for Power: Sustainable biomass import from Ukraine. Project code: DBI01010 (2010-2013 рр.) та проекту НДДКР «Розробка оптимальних енергетичних систем з урахуванням наявного потенціалу відновлюваних джерел енергії в умовах Лісостепу України» (№ ДР 0117U000397, 2017-2019 рр.). Та відповідно до державних науково-технічних програм: «Розробка технологій виготовлення та внесення альтернативних видів органічних добрив в умовах дефіциту гною (№ ДР 0116U005148, 2016-2025 рр.) – 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 дослідження.** *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 передбачається виконання 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 фактор депонування вуглецю в ґрунті.

**Предмет вивчення:** 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 в науковців відповідно до мети та об'єкту досліджень. *Стаціонарного польового дослідження* та визначення основних ґрунтових та агрохімічних показників, у тому числі емісії CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> та секвестрації C<sub>орг</sub> в ґрунті.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

*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;
- обґрунтоване значення насаджень енергетичних культур як фактору депонування вуглецю в ґрунті.

*Удосконалено:*

- процедуру в 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.

*Набули 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. Також рекомендовано під час висвітлення 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. 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 у навчальний процес Полтавського державної аграрного університету під час викладання дисциплін «Моніторинг довкілля», «Екологія ґрунтів», «Глобальні екологічні виклики та шляхи їх подолання» за спеціальністю – 101 – екологія.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота є самостійним дослідженням автора 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 отриманих результатів, підготовлено та опубліковано розділи монографій, наукові татті, патенти, запроваджено науковий супровід результатів дослідження у навчальний процес.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи і результати досліджень доповідалися та обговорювалися на щорічних засіданнях кафедри екології, збалансованого природокористування та захисту довкілля та кафедри землеробства та агрохімії ім. В. І. Сазанова; на Міжнародній конференції «Applied Biotechnology in Mining» (Дніпро 2018); міжнародних науково-практичних конференціях "Ефективне функціонування екологічностабільних територій у контексті стратегії стійкого розвитку: агроекологічний, соціальний та економічний аспекти" (Полтава 2018-2021); 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, 3 патенти на корисну модель, 1 свідоцтво авторського права на науковий твір, розділи у трьох колективних монографіях (з них, одна – мовами ЄС); 8 тез доповідей і матеріалів наукових конференцій.

#### **Обсяг і структура роботи.**

Дисертаційна робота викладена на 175 сторінках комп'ютерного тексту, й складається зі вступу, 7 розділів, висновків, рекомендацій виробництву, списку використаних джерел і додатків. Вона містить 11 таблиць 46 рисунків. Список використаних посилань містить 244 джерел 215 з яких англійською мовою.



## РОЗДІЛ І.

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

#### 1.1. Фіторемедіаційні аспекти використання енергетичних культур в умовах України

Зростання цін на енергоносії, очищення земель від важких металів, зниження рівня використання непоновлюваних джерел енергії та залучення альтернативи до паливно-енергетичного комплексу України нині є нагальними питаннями, які потребують невідкладного вирішення [4]. Тому виникає потреба у всебічному вивченні найбільш поширених на території нашої країни таких енергетичних культур, як верба, міскантус, світчграс – фіторемедіантів та рослинної енергетичної сировини [5]. Після відповідної обробки з надземної вегетативної маси цих культур виготовляють рідкі, тверді та газоподібні види біопалива, що можуть бути перетворені в теплову, механічну та електричну енергію, а в перспективі зменшать використання в різних сферах виробництва вугілля, нафти та природного газу [6,7]. В Україні є всі необхідні можливості, передусім ґрунтово-кліматичні, які сприяють отриманню високоврожайної енергоємної біомаси енергетичних культур, та наявність значних площ, непридатних для вирощування сільськогосподарських культур (маргінальні землі) [8–12]. Сьогодні науковці інтенсивно вивчають і вдосконалюють технологію вирощування енергетичних культур. Серед дослідників вітчизняні вчені: М. В. Роїк, В. Л. Курило, Д. Б. Рахметов, В. А. Доронін, М. Я. Гументик, О. М. Ганженко та ін. Поряд з агрономічно-обґрунтованим менеджментом вирощування енергетичних культур, актуальним та недостатньо вивченим питанням залишаються екологічні аспекти вирощування цих рослин на маргінальних землях [5]. У контексті тенденцій, що панують у сфері світової і державної енергетичної політики та безпеки використання енергетичних

культур, міскантус (*Miscanthus giganteus*), просо прутоподібне (*Panicum virgatum*), енергетична верба (*Salix*) та ін., пропагуються як сировина для виробництва екологічно чистого, вуглецево-нейтрального та дешевого біопалива. Тому місце вирощування цих рослин та вид землекористування стають важливими критеріями для виробництва альтернативних видів палива [5,13,14].

Згідно з вимогами IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), під час закладання плантацій енергетичних культур використовують землі несільськогосподарського призначення (маргінальні землі), оскільки зворотна тенденція спровокує конкуренцію з виробництвом харчових продуктів [15]. Вирощування енергетичних культур на землях з високим умістом вуглецю, наприклад ліси, торф'яники та луки, призведе до непрямой зміни землекористування (Indirect Land Use Change – ILUC), що суперечить європейській концепції Сталого розвитку. І в Україні, і у світі для створення енергетичних плантацій намічена тенденція використання земель несільськогосподарського призначення (малопродуктивні ґрунти, деградовані, забруднені землі) [5,16].

Світове техногенне забруднення навколишнього середовища, що почалося в середині минулого століття, набуло глобального характеру. Ситуація продовжує погіршуватися, оскільки збільшуються темпи зростання світового виробництва й споживання продукції нафтохімічного комплексу [17–19]. З-поміж основних джерел забруднення навколишнього середовища поліциклічними вуглеводнями (коксохімічне виробництво, установки спалювання викопного палива – ТЕС, ГЕС, котельні, чорна й кольорова металургія, виробництво будівельних матеріалів, целюлозно-паперова, хімічна, нафтохімічна, паливна промисловості, а також транспорт, комунальне й сільське господарство) головна роль належить підприємствам нафтової галузі [20,21]. Щорічно в результаті “природного витоку” і аварійних розливів на нафтопроводах та родовищах у навколишнє середовище надходить 5–10% від добутої нафти, що становить 1,7–8,8 млн т. Серед нафтових вуглеводнів

особливу загрозу являють поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), що є персистентними поллютантами, які володіють високою токсичністю й стійкістю до розкладання. Ці речовини характеризуються біоаккумуляцією, є об'єктом трансграничного переносу в повітрі й воді, мають здатність осідати на великій відстані від джерел викидів, накопичуються у воді й наземних екосистемах [5].

У глобальному екологічному масштабі існують дві основні проблеми: постійне збільшення площ забруднених земель та посилення вимог до біоенергетики. Тому зв'язок фітореMediaції з енергетичними культурами для подальшого сталого розвитку – це вимога не тільки сучасності, але і майбутнього. Ряд країн систематично працюють над пошуком нових потенційних енергетичних культур для виробництва як рідкого, так і твердого біопалива, а також розглядають можливості фітореMediaції на забруднених землях. У цьому напрямі проведені численні дослідження щодо фітотерапії ґрунту з використанням енергетичних культур [22–25]. Обрані культури повинні відновлювати забруднені території, підвищувати якість ґрунту, створювати естетично приємний ландшафт та депонування вуглецю. У такий спосіб відбувається потенційний зв'язок між вирощуванням енергетичних культур та фітореMediaцією забруднених земель [26].

Використання деградованих або забруднених земель сприяє частковому вирішенню проблеми використання сільськогосподарських угідь для отримання рослинної сировини на енергетичні цілі [27]. Території з відсутнім або недостатнім рослинним покривом є регулярним додатковим джерелом забруднення через процеси вилуговування або ерозії ґрунту, що завдає шкоди природним ресурсам. Повторне використання таких територій для виробництва біоенергетичних культур може бути корисним рішенням з екологічної точки зору [17]. Максимальний фітореMediaційний ефект на забруднених землях спостерігається у швидкорослих видів деревних рослин, при цьому дуже мало уваги приділяється використанню трав'яних енергетичних культур [28], і лише у кількох джерелах описано використання багаторічних культур другого покоління біопалива для фітореMediaції забруднених земель [29]. Наявне

різноманіття енергетичних культур сприяє виробництву біопалива та очищенню забруднених ділянок. Для успішного впровадження та використання багаторічних енергокультур необхідно зрозуміти і проаналізувати поточний стан проблеми та розробити ефективні стратегії використання багаторічних трав як фіторе mediaційний засіб, уникаючи негативних наслідків для суспільства й навколишнього середовища [30,31]. Не в повній мірі вивчено особливості використання енергетичних культур для фіторе mediaції різних типів забруднених земель на фоні різних забруднювачів [5].

Ґрунти в Україні постійно забруднюються поллютантами, зокрема залишками пестицидів, важкими металами, і площі таких земель зростають. Це є наслідком не лише діяльності підприємств важкої металургії та хімічної промисловості, а й нераціонального використання хімічних засобів захисту рослин в аграрному секторі виробництва. Щороку асортимент шкідливих препаратів збільшується. Додають неприємностей і відходи двигунів внутрішнього згоряння транспортних засобів, видобуток і переробка корисних копалин, міські стоки мегаполісів тощо. Території практично всіх бензозаправних станцій, паливних баз, промислових підприємств нафтопереробного комплексу, автомобільних і залізничних магістралей в тій чи іншій мірі забруднені ПАР. Маргінальні землі можуть простиратися на великі відстані, що ускладнює проведення традиційних рекультиваційних робіт, та загрожувати здоров'ю людини [32]. Так, важкі метали й хімічні забруднювачі середовища, накопичуючись і просуваючись по харчовому ланцюгу (ґрунт–рослина–тварина–людина), уражають різні органи тварин і людини, викликаючи захворювання [33–37]. Тому виникає потреба у вивченні інноваційних способів очищення ґрунтів від важких металів та їх сполук. Одним з ефективних способів позбавлення ґрунту від забруднювачів є фіторе mediaція [5].

Відновлення функціональних та екосистемних властивостей забруднених земель дозволить повернути їх до сільськогосподарського використання [38–41]. Варіанти фізико-хімічної реабілітації забруднених ґрунтів зазнають

критики через їх високу вартість та недостатню ефективність. Використання рослин і супутніх з ними мікроорганізмів може бути стійким та економічно вигідним засобом зменшення впливу забруднюючих речовин на ґрунтовий комплекс. Фітоменеджмент має бути спрямований на використання непродовольчих культур для пом'якшення екологічних і санітарних ризиків, спричинених забруднювачами, та відновлення властивостей екосистеми. Культури, що використовуються для відновлення ґрунтів, повинні бути толерантними до забруднюючих речовин, унеможливити їх перенесення в харчовий ланцюг і ефективно виробляти товарну біомасу [5]. Виходячи зі здатності енергетичних культур накопичувати неорганічні забруднювачі в кореневій системі та розкладати стійкі органічні забруднювачі в ґрунті, ці види рослин є оптимальними для фітостабілізації та фітодеструкції. Вирощування енергетичних культур на забруднених та деградованих ґрунтах вважаємо перспективним варіантом з метою уникнення використання орних земель сільськогосподарського призначення та зменшення конкуренції між продовольчим та біоенергетичним землекористуванням [42,43] .

Згадані енергетичні культури характеризуються високим потенціалом виробництва біомаси та низькими затратами для вирощування, тому вони можуть зайняти лідируючі позиції з-поміж рослин, що використовують для очищення ґрунтів. Оскільки за існуючої глобальної тенденції обмеження земель сільськогосподарського використання, розвиток біоенергетичної промисловості, що заснована на вирощуванні енергетичних культур, має базуватися на використанні маргінальних земель. Тому в даній публікації увага зосереджена на оцінці екологічності енергетичних культур в умовах маргінальних земель, які в цьому контексті визначаються як землі, що не використовуються в сільськогосподарському виробництві [5].

Перші наукові дослідження з очищення ґрунтів і води проведені в 50-х роках минулого століття в Ізраїлі, однак активний розвиток очищення ґрунтового комплексу з використанням рослин відбувся тільки у 80-х роках. У зв'язку з впровадженням ефективної й малозатратної технології з'явився новий

термін “фітореMediaція навколишнього середовища”, що припускає відновлення антропогенно порушених екосистем за участі рослин. Цей термін фактично відноситься до технологій у рослинництві, де використовуються природні або генетично модифіковані культури для очищення забруднених екосистем [44]. Термін “фітореMediaція” був розроблений професором Центру біотехнологій сільського господарства та природокористування Рутгерського університету (США) Іллею Раскіним у 1989 році [45]. У світі існують органічні та неорганічні забруднювачі, але забруднення ґрунтів важкими металами є великою проблемою. В Україні на забруднення ґрунтів важкими металами припадає понад 37% випадків, 33,7% випадків забруднення мінеральними маслами, 13,3% випадків – поліциклічними ароматичними вуглеводнями і т. ін. [46].

ФітореMediaційна технологія заснована на здатності рослин видаляти токсичні речовини з навколишнього середовища або перетворювати їх у безпечні сполуки – метаболіти. У такий спосіб рослини здатні виключити третю і четверту ланки даного ланцюжка, запобігаючи потраплянню важких металів і хімічних забруднювачів в організм людини [47–49]. Отже, фітореMediaція – це ефективна й економічно вигідна технологія, заснована на використанні рослин і асоційованих з ними мікроорганізмів-деструкторів. У силу свого взаємовигідного співіснування рослинно-мікробні асоціації (симбіози) мають більші переваги при виживанні в несприятливих умовах навколишнього середовища. Важливим етапом у розробці технології фітореMediaції є вибір найбільш придатної рослини; дотепер загальноприйнятого підходу в цьому контексті не існує. Використання тих або інших рослин часто ґрунтується на їхній здатності зростати та розвиватися на забруднених територіях або просто за наявності насінного матеріалу [50]. З-поміж відомих видів фітореMediaції одним з ефективних є фітоекстракція, яку використовують для очищення ґрунтів і водойм, забруднених важкими металами й радіонуклідами. Особливість фітоекстракції – поглинання забруднювачів кореневою системою рослин разом з поживними речовинами й

транслокація їх у надземні органи. По завершенні вегетації й транслокаційних процесів надземні органи рослин скошуюють і піддають відповідній переробці [51]. Наприклад, після озолення зібраної біомаси зола стає джерелом кольорових металів. Якщо одержання металів із золи обходиться дорожче їхньої собівартості, то біомасу рослин компостують. Ефективність фітоекстракції визначається коефіцієнтом біоаккумуляції, що дорівнює відношенню концентрації металів у рослинах до концентрації їх у ґрунті або в забрудненій воді [52]. Фітостабілізація являє собою ефективний захід використання рослинності для очищення ґрунту від забруднюючих речовин шляхом модифікації хімічних речовин, використання біологічних та фізичних процесів у ґрунті. Переміщення забруднювача у ґрунти може бути зменшено внаслідок всмоктування та накопичення його коренями; адсорбції кореневою системою; опадів; комплексоутворення або зменшення валентності металів у ґрунті в межах кореневої зони; зв'язування з гуміновими (органічними) речовинами через процес гуміфікації. Крім того, рослинність може зменшувати вітрову та водну ерозію ґрунту, запобігаючи розповсюдженню забруднювача в стоки, перешкоджати викидам пилу, утворенню вихлопних газів [53].

Літературних даних та наукових досліджень про ремедіаційну здатність енергетичних культур сьогодні бракує, але низка дослідників відмічає, що очищення ґрунтів від полютантів ефективніше відбувається шляхом фітостабілізації. Над питанням фітоочищення працюють науковці Польщі та Румунії [42], Франції, США [47,54–58]. Відзначимо, що експерименти здебільшого проводяться в лабораторних умовах, а не в польових. Це, ймовірно, пов'язано з тим, що вказані культури є новими, інтродукованими до інших кліматичних умов, тому основні дослідження спрямовані на вивчення їх генетичних, адаптивних, агрономічних та фізіологічних властивостей на незабруднених землях [47]. Посилаючись на проведені переважно за кордоном окремі дослідження, констатуємо, що за високих концентрацій іонів важких металів пригнічується ріст і накопичення вегетативної біомаси в рослинах [59]. Дослідження європейських наукових інститутів [60–62] свідчать про те, що

високі концентрації важких металів пригнічувально впливають на ріст та розвиток деяких видів енергетичних культур через пошкодження коренів та зниження мінерального живлення, особливо азоту і фосфору. На противагу цьому, в польових умовах (протягом двох сезонів) інших досліджень енергетичні культури формували потужну фітомасу та високу врожайність на промислово забруднених землях [63,64]. Енергетичні рослини неоднаково взаємодіють з поживним середовищем, а рівні опору до стресових факторів залежать від умов вирощування і можуть відрізнятися в різних видів і популяції [60,65].

Деякі дослідники відзначають, що вирощена енергетична культура в межах забруднених сільськогосподарських районів може призвести до надмірної концентрації металів у тканинах рослин і повторних викидів забруднюючих речовин в атмосферу під час спалювання біомаси [66]. Вибір культур для біоенергетичних цілей повинен урахувати ґрунтові та кліматичні умови регіону, а також технічні можливості фермерів. Адже встановлено, що накопичення іонів важких металів у межах різних тканин рослинного організму розподіляється в такому порядку: корені > стебла > листки [47]. Лабораторні дослідження румунських учених за порівняльного аналізу двох біоенергетичних культур показали, що іони важких металів накопичуються не тільки в кореневій системі, а й у надземній. Експеримент проводили на штучно забрудненому свинцем суглинковому і піщаному ґрунтах. Отриману сировину як біопаливо використовували у вигляді січки, брикетів, паливних гранул [55,67,68]. Поряд з цим у сучасних наукових публікаціях неповною мірою висвітлені особливості накопичення важких металів енергетичними культурами, механізм переходу забруднювачів із ґрунту в рослини; потребує уточнення й використання моделі очищення ґрунтів від поллютантів, що і обумовило актуальність наших досліджень в обраному напрямку.

До земель несільськогосподарського призначення належать забруднені ґрунти поблизу гірничодобувних і металургійних виробництв; кар'єри, полігони твердих побутових відходів та інші маргінальні території,



особливістю яких є перевищуючий ГДК вміст як неорганічних (важкі метали: Pb, Cr, Al, Zn, Ni та ін.), так і органічних (поліциклічні ароматичні вуглеводні, пірен, фенатрен, поліфенольні сполуки та ін.) сполук. Тому актуальним питанням є вивчення непродовольчих багаторічних культур, які можуть слугувати фіторемедіантами, зокрема енергетичні культури: верба, міскантус гігантський, світчграс, сорго багаторічне, біг-блуестем. Такі рослини швидко формують потужну кореневу систему та надземну вегетативну масу, мають багаторічний цикл життя, високий коефіцієнт біоаккумуляції, спрощену технологію вирощування та збирання фіто маси [5]. Натепер розроблені вітчизняні та зарубіжні методики проведення досліджень з енергетичними культурами, науково-практичні рекомендації, спеціальні методики вирощування [69] та використання енергетичних культур [70].

Енергетичні культури з короткою ротацією можуть бути використані для відновлення забруднених земель як альтернативний спосіб фіторемедіації. Широкий спектр видів рослин має потенціал для використання в біоенергетичних та фіторемедіаційних областях на основі їх екосистемних властивостей для встановлення кращого зв'язку між фітотерапією ґрунту – відновлення та виробництво біопалива [46]. Ми зосереджуємо увагу на обґрунтуванні ефективності використання п'яти потенційних культур для великомасштабного виробництва біопалива: *Salix*, *Miscantus* × *giganteus*, *Panicum virgatum* L., *Sorghum almum* Parodi, *Andropogon gerardi*, враховуючи їх ботаніко-біологічні, адаптивні особливості, поширеність, фіторемедіаційний ефект та потенціал поглинання вуглецю. Верба кошикова (*Salix*) – рід дерев, кущів або напівкущів родини вербових (Salicaceae). Це невибаглива морозостійка культура, річна висота кущів якої сягає 2,5 м. Верба має добре розвинену кореневу систему, може зростати на ґрунтах з відносно легким гранулометричним складом, вирізняються швидким приростом біомаси, невибагливістю до родючості ґрунту та вологи. Рослина багаторічна, розмножується лише вегетативно. Урожайність – до 30 т/га сухої маси енергоємністю 18–20 МДж/кг [46,71].

Міскантус гігантський (*Miscantus × giganteus*) – це теплолюбна, багаторічна рослина з родини злакових (*Gramineae*), яка формує потужну мичкувату кореневу систему, має прямостоячі стебла, що досягають 5 м у висоту, шорсткі листки до 50 см довжиною. Розмножується лише вегетативно (ризомами). Урожайність міскантусу – 20–30 т/га сухої маси за енергоємності 18–19 МДж/кг. Міскантус може формувати врожай два рази на рік [72,73], має додатковий потенціал для виробництва целюлози [74] та панельних дощок, декоративних будівельних матеріалів [75,76]. Солома міскантусу використовується як підстилка для тварин. Завдяки здатності поглинати вуглець з атмосфери міскантус накопичує ґрунтовий органічний вуглець та сприяє розвитку різноманітності ґрунтової мікробіоти [77]. Деякі дослідження свідчать про випадки фіксування азоту рослинами в присутності азотфіксуючих бактерій [78]. Міскантус використовують і для фітообробки стічних вод та шламів [42]. Вирощування цієї рослини на збіднених ґрунтах запобігає їх ерозії [55].

Зниження рівня продуктивності вегетативної маси міскантусу спостерігається за надто високих концентрацій забруднюючих речовин [55,60]. У різних дослідженнях [28,42,79] також було відмічено депонування міскантусом деяких важких металів (As, Sn, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn та Al), які зазвичай максимально накопичувалися в нижній частині рослин, а в низькорослих видів – у стеблах та листках [43]. Крім накопичувального ефекту, міскантус сприяє біодеградації органічних забруднювачів кореневими ексудатами рослин [29,80,81], таких як поліциклічні ароматичні вуглеводні, нафта та пестициди. Планації міскантусу можуть використовуватися для фітоменеджменту міських стоків.

Просо прутоподібне (*Panicum virgatum L.*), або світчграс – це посухота морозостійка багаторічна рослина з родини злакових (*Gramineae*), яка формує потужну мичкувату кореневу систему, порожнисті стебла висотою до 3 м, з листками до 60 см [58,82]. Рослина формує суцвіття – волоть, розмножується насінням і поділом кореневищ. Урожайність сухої біомаси – до 25 т/га, насіння

– 0,34–0,76 т/га. Сорго багаторічне (*Sorghum alnum* Parodi.) належить до родини тонконогих. Рослина заввишки 230–300 см. Коренева система добре розвинена і проникає в ґрунт на глибину 2,0–2,5 м. Особливість культури – наявність первинної та вторинної кореневих систем. Польова схожість насіння становить 75–80%. Оптимальна температура для розвитку – плюс 18–25 °С. Урожайність зеленої маси на початку формування волоті забезпечує 30–35 т/га, у період цвітіння – 45–50 т/га і плодоношення – 65–75 т/га, насіння становить 1,5–1,7 т/га. Вихід сухої фітосировини – 11–14 т/га. Енергетична цінність становить 3750–3810 ккал/кг [58,82,83].

Біг-блуестем (*Andropogon gerardi*), бородач Жерара – це багаторічна злакова культура. Використовується як кормова трава, а з урахуванням високого вмісту целюлози та низьких затрат на вирощування – як перспективна сировина для виробництва етанолу та біомаси [84]. Рослина – багаторічний кущовий злак, що формує добре облиствені стебла висотою 1–3 м, суцвіття та волоть, в якій визріває насіння – дрібна зернівка. Коренева система проникає глибоко в ґрунт, розростається, створює добру дернину. Рослина невибаглива до родючості ґрунтів, має стійкість до засолення [84].

В Україні проведено агрокліматичне районування й визначено зональні особливості підбору сортименту сільськогосподарських і енергетичних культур та технології їх вирощування [9]. Були виділені зони вирощування енергетичних культур з урахуванням їх особливостей та реакцій на ґрунтово-кліматичні умови. З огляду на морфолого-біологічні особливості, відношення рослин до температурного режиму та кількості опадів за вегетаційний період енергетичні культури в Україні доцільно розміщувати по зонах: верба кошикова міскантус гігантський та просо прутоподібне – Полісся (П); міскантус гігантський, просо прутоподібне, біг-блуестем, сорго багаторічне – Полісся і Лісостеп (Л); просо прутоподібне, біг-блуестем, сорго багаторічне – Лісостеп і Степ України (Ст). За дотримання відповідних умов зрошення в степовій зоні можна вирощувати різні види міскантусу та генотипи верби [9]. Дослідження зарубіжних авторів підтверджують нашу гіпотезу про

поєднання рекультивації ґрунту з використанням швидкорослих деревних енергетичних культур і подальшою їх енергетичною утилізацією як реальний, економічно вигідний захід. Поруч з такими дерев'яними енергетичними рослинами, як верба і тополя доцільно вирощувати і трав'янисті види: сорго, міскантус та світчґрас [46].

Вегетативна фітомаса, формуючи продуктивність за допомогою потужної кореневої системи, акумулювала значну кількість важких металів з ґрунтового комплексу. Агрохімічний аналіз ґрунту та надземної вегетативної маси енергетичних культур вказує на чітку динаміку поглинання важких металів кореневою системою рослин [47,55,57]. Вміст важких металів у ґрунті з роками дослідження знижується. Доведено також ефективність енергетичних культур за багаторічного циклу вирощування в накопиченні на поверхні ґрунту мульчуючого шару та збагаченні його на вміст органічної речовини [22,85]. Залежно від складу хімічних елементів були розраховані коефіцієнти переходу важких металів у вегетативну та генеративну частини рослин енергетичних культур (загальну фітомасу). Оскільки відсоток важких металів у фітомасі в межах одного вегетаційного періоду становить 5–20% від загальної кількості забруднювача, то в перші роки життя рослин акумулювання важких металів було незначним, а коефіцієнт переходу з кореневої системи до рослини ( $K_p$ ) – низьким. У подальші роки він значно збільшився, що можна пояснити інтенсивним розвитком вегетативної маси енергетичних культур [86–88]. Найвищим коефіцієнтом переходу з ґрунту в рослини енергетичних культур характеризувався кадмій. У загальній фітомасі його  $K_p$  становив понад 0,5. Низький коефіцієнт переходу в рослини мав кобальт (менше 0,1). Коефіцієнт міді був на рівні 0,5; для цинку і свинцю – менше 0,5. До того ж було визначено, що міскантус гігантський є більш урожайним, ніж світчґрас, хоча вміст сухої речовини в нього менший, накопичення важких металів у фітомасі рослин – більше, а вміст ГДК нижче регламентованих норм. Встановлено, що незалежно від виду енергетичної культури інтенсивність переходу важких металів у системі “ґрунт–рослина” має такий вигляд:  $Cd \rightarrow Cu \rightarrow Zn \rightarrow Pb \rightarrow Co$

[57,58]. Дослідження, проведені за кордоном, дають підставу стверджувати, що фітомаса енергетичних культур може бути використана і як сировина для виробництва екологічно чистого біопалива [89]. Аналогічний дослід показав, що продукція, отримана при вирощуванні енергетичних культур на забрудненому ґрунті, є джерелом його вторинного забруднення [90]. Отже, досліджувані енергетичні культури мають значний потенціал до фітостабілізації важких металів на забруднених землях, запобігаючи подальшій міграції полутантів у ґрунтові води або повітря [91]. Ураховуючи такі властивості енергокультур, доречно вирощувати їх на забруднених землях за розробленою моделлю, відповідно до агрокліматичного районування. Це забезпечить умови, близькі до сприятливих для росту і розвитку рослин, дозволить отримувати енергоємну фітомасу з мінімальним умістом забруднювачів [92].

Оцінка характеру забруднення ділянки передбачає проведення агрохімічного аналізу вмісту важких металів у ґрунті, визначення ступеня їх поширення в ґрунтовому комплексі, складання карт забруднення [52]. Етап безпосереднього вирощування рослин включає проведення комплексу агротехнічних заходів, у тому числі підготовку насінного матеріалу, визначення схеми сівби/висаджування, підготовку ґрунту, внесення мінеральних добрив, використання засобів захисту та ін. Постійний моніторинг ділянки має на меті періодичне визначення концентрації й поширення хімічних компонентів, проведення інформаційного аналізу та прогнозування за допомогою математичних моделей та графіків. Якщо концентрація забруднюючих речовин в отриманій енергетичній сировині перевищує допустимі рівні, то пропонується змішувати її та матеріал з незабруднених територій або біомасу деревини, щоб знизити рівень металів у біопаливі. Необхідно звернути увагу на те, що спалювання біомаси зі забруднених земель, які можуть містити оксиди металів, відбувається на електростанціях [45]. З метою сталого виробництва енергетичної біомаси необхідно отримати дані про динаміку росту і продуктивність культур на маргінальних, забруднених землях, про здатність

рослин адаптуватися до місцевих умов довкілля; провести моніторинг якості біомаси відповідно до вимог біопаливної промисловості; оцінити вартість виробництва біопалива [43].

Поряд зі здатністю енергетичних рослин до фітореMediaції забруднених важкими металами ґрунтів встановлено, що вони мають потенціал до розкладання органічних забруднювачів, зокрема поліциклічних ароматичних вуглеводнів. Доведено, що кореневі екsudати культур мають деструкційну здатність – вони розкладають пірен і фенатрен [93,94]. Виявлено, що поліфенольні сполуки, флавоноїди, присутні в ризосфері, наприклад *M. giganteus*, стимулюють зростання мікроорганізмів, які утилізують поліциклічні ароматичні вуглеводні [94,95]. Ці дані свідчать про необхідність більш глибокого вивчення фізіологічних і біохімічних особливостей енергетичних культур в умовах забруднення ґрунтів не тільки неорганічними, але й органічними ксенобіотиками. Досліджувані рослини можуть бути не тільки показовим об'єктом для вивчення механізму поглинання, акумуляції та детоксикації ксенобіотиків у ґрунті, але й вирішити проблему відновлення ґрунтів, забруднених токсикантами техногенного походження. У зв'язку з цим виникає питання про раціональне використання маргінальних і деградованих земель, що мають антропогенне забруднення, особливо неорганічних та органічних сполук.

Енергетичні культури здатні формувати високий потенціал урожайності в різних ґрунтово-кліматичних зонах України, є представниками рослин для фітореMediaції, що мають найвищу здатність поглинати важкі метали і частково акумулюють їх у своїх підземній та надземній частинах. По завершенні вегетації надземна вегетативна маса рослин може підлягати відповідній переробці, є додатковим джерелом кольорових металів, біопаливом для енергетичних цілей. Найпоширенішими забруднювачами ґрунтів в Лісостепу України є кобальт, молібден, у західній частині Лісостепу – мідь, показники вмісту яких перевищують не лише фонові значення, а й ГДК. Уміст цинку на більшості території країни відповідає регламентованим нормам. Інтенсивність

переходу важких металів у системі “грунт–рослина” енергетичних культур має вигляд: Cd →Cu →Zn →Pb. Запропонована модель очищення ґрунтів від важких металів за допомогою енергетичних культур включає оцінку характеру забруднення ґрунту, оптимальну схему фітореMediaції, моніторинг ділянки [5].

Вирощування енергетичних рослин як фітореMediaнтів на забруднених землях дозволить не лише знизити рівень деградації, а й підвищити агрономічну цінність цих ґрунтів. Висока продуктивність біомаси енергетичних культур (до 30 т/га) може перетворити технологію фітореMediaції в прибуткову галузь для біоенергетичної промисловості. Енергетичні культури накопичують органіку в ґрунті, збільшуючи вміст карбону в ньому, інтенсивно поглинають вуглекислий газ і зменшують наслідки глобального потепління.

## 1.2. Роль ґрунту в кругообігу карбону

Карбон є одним з найпоширеніших елементів у Всесвіті і зустрічається практично скрізь на планеті: у повітрі, океанах, ґрунті та гірських породах [96,97]. Він є активним учасником геологічної історії гірських порід, і особливо древніх родовищ, що утворювали вугілля, нафту та інших енергоносіїв, що використовуються сьогодні [98]. Карбон також є важливим будівельним елементом життя та складовою частиною всіх рослин та тварин на планеті [99]. Він має високу хімічну активність, що дозволяють йому утворювати сполуки з багатьма іншими елементами. Ця властивість дозволяє утворювати молекули, корисні та необхідні для підтримки життя. Роль карбону в живих системах настільки значна, що йому присвячений цілий розділ досліджень: органічна хімія. Вуглець, ще неповністю був зв'язаний гірськими породами або океанічними осадовими породами, надходить в атмосферу, або накопичується у ґрунті. Цей процес називається кругообігом карбону [100].

Ґрунт містить найбільшу частину активного вуглецю на планеті [100]. Рослини засвоюють його з повітря і перетворюють його в рослинні тканини,

частина яких повертається в ґрунт у вигляді рослинних залишків [101]. Вуглець має вирішальне значення для функціонування ґрунту та його продуктивності, а також сприяє оптимізації ґрунтових умов [102–104]. Управління ґрунтами відіграє вирішальну роль у тому, чи залишається вуглець у ґрунті чи потрапляє в атмосферу [105]. Сільськогосподарські практики можуть впливати як на кількість, так і на склад органічного вуглецю в ґрунті, а отже, також на фізичний, біологічний та хімічний стан ґрунту, поєднання факторів, що визначають здоров'я ґрунту [106–108]. Тому сільськогосподарські практики, що впливають на режим вуглецю, впливають і на продуктивність та стійкість сільського господарства [109–113]. Сільськогосподарський сектор здатний впливати на кругообіг вуглецю у великих масштабах [114]. Агровиробники зацікавлені в збереженні та збільшенні органічного вуглецю в ґрунті для окремих полів, оскільки ґрунт та врожайність, як правило, поліпшуються, коли ґрунт збагачується органічними добривами [115–119].

Карбон є основним будівельним матеріалом рослинного світу та головним складовим елементом органічної речовини ґрунту (ОРГ) [120–123]. Двоокис вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) є газоподібною сполукою вуглецю та парниковим газом. З початку промислової революції рівень  $\text{CO}_2$  піднімався приблизно на 1,5% [124–127]. Продовження зростання в атмосфері концентрації  $\text{CO}_2$  може призвести до глобального потепління [128–131]. Порушення короткочасного циклу карбону, призводить до зміни концентрації вуглекислого газу в атмосфері, що, у свою чергу, спричиняє потенційні зміни клімату [132–134]. Асиміляція  $\text{CO}_2$  рослинами та накопичення органічного вуглецю ґрунту є одним із можливих механізмів зменшення зростання концентрації  $\text{CO}_2$  в атмосфері. Довгострокове зниження рівня атмосферного  $\text{CO}_2$  вимагає зменшення споживання викопного палива та розробки альтернативних джерел енергії [135–138].

Завдяки фотосинтезу рослини асимілюють вуглець з повітря, утворюючи органічні вуглецеві сполуки. Надлишок  $\text{CO}_2$ , який не викорисно для формування вегетативної маси, виділяється через коріння для живлення



грунтових організмів, завдяки чому відбувається процес гуміфікації [103,139–142]. Перспективною стратегією є посилення мікробіальної активності ґрунту шляхом додавання корисних мікробів, щоб стимулювати біотичні цикли в ґрунті там, де вони були перервані використанням інсектицидів, гербіцидів або добрив [143–146].

Органічний вуглець ґрунту є вимірюваним компонентом органічної речовини ґрунту [120,122,147,148]. Органічний вуглець ґрунту (SOC) відіграє важливу роль як поглинач, так і джерела атмосферного вуглецю. Органічна речовина складає лише 2–10% більшої маси ґрунту і відіграє важливу роль у фізичній, хімічній та біологічній функції сільськогосподарських ґрунтів [149–151]. Органічні речовини сприяють утриманню та обороту поживних речовин, структурі ґрунту, збереженню та забезпеченню вологи, деградації забруднюючих речовин, поглинанню вуглецю та стійкості ґрунту [152]. Кожна тона органічного вуглецю є еквівалентом приблизно 3,67 тонни атмосферного вуглекислого газу. Потенціал збільшення зберігання органічного вуглецю в ґрунті залежить від типу ґрунту, клімату та факторів управління, багато з яких є поза нашим контролем [153–156]. Зменшення викидів є надзвичайно важливим, але поглинання вуглецю в ґрунті також має бути частиною цієї картини. Головними пріоритетами є відновлення деградованих та еродованих земель, а також уникнення вирубки лісів та вирощування торфовищ, які є основним резервуаром вуглецю і легко розкладаються при дренажі та обробітку [14,157–159].

Втрати вуглецю в ґрунті протягом першої половини 20 століття частково були відновлені у другій половині в міру вдосконалення практики збереження ґрунту та інтенсифікації систем посівів [160–162]. Правильна практика відтворення родючості та вдосконалення гібридів та сортів також зіграли свою роль у підвищенні рівня органічного вуглецю в ґрунті. Більш високі врожаї та більша інтенсивність посівів збільшують кількість біомаси, що повертається в ґрунт, забезпечуючи більший внесок, який може стати органічним вуглецем ґрунту [130,163,164].

Ґрунт і ґрунтовий покрив є індикаторами глобальних змін клімату [165–167]. А за процесами, що відбуваються в ґрунті, можна судити про майбутні глобальні зміни клімату [168–170]. Режим температури й вологості, газовий склад і біотичні параметри ґрунту в біотопі найшвидше змінюються за впливу клімату [171–174]. Дослідження впливу клімату на ґрунтоутворювальні процеси та властивості ґрунту проводили з часів робіт В. Докучаєва, однак і досі залишається багато аспектів не до кінця з'ясованих [175]. Але при цьому слід враховувати, що ґрунти є невідновлюваним ресурсом, а процес їхньої регенерації надзвичайно повільний і потребує значних витрат матеріальних і енергетичних ресурсів [176–180]. Європейська комісія і Міжурядова група експертів зі зміни клімату визначили зниження вмісту органічного карбону в ґрунті в усьому світі як екологічний ризик, що знижує не лише родючість ґрунту та врожайність агрокультур, а отже є і загрозою продовольчій безпеці. Проте новий акцент учених на якість ґрунту з позиції вмісту органічного карбону в обговоренні змін клімату і забезпечення продовольчої безпеки дає змогу поставити рівність між такими категоріями: органічний карбон ґрунту = родючість ґрунту = продуктивність = продовольча безпека [181–184]. Зменшення рівня врожайності призводить до зменшення надходження в ґрунт органічних речовин у вигляді корневих й пожнивних решток, що спричинює подальше зменшення продуктивності агроecosystem, змін видового та сортового складу вирощуваних культур [185–189].

Існує значне занепокоєння щорічним глобальним приростом CO<sub>2</sub> в атмосфері близько 1,5 проміле. На сьогоднішній день існує думка, що необхідно виводити або з атмосфери, або запобігати виділенню трьох гігатон (Гт) на рік вуглецю, щоб уникнути тепличного потепління землі. Запропоновані рішення приділяють мало або зовсім не звертають уваги на роль органічної речовини ґрунту у зменшенні атмосферного накопичення CO<sub>2</sub>. Світовий запас вуглецевої речовини в ґрунті становить близько 3000 тонн, тож у найближчому майбутньому для виведення трьох вуглецевих вуглеводнів з атмосфери потрібно буде збільшити до 0,1 відсотка до поточного обсягу на рік. Якби це

вдалося досягти, на додаток до сприяння зменшенню можливого глобального парникового ефекту, це може призвести до масового поліпшення ґрунту, особливо якщо підвищена органічна речовина ґрунту буде зосереджена на землях, які потребують поліпшення. Побічно вуглець переноситься з викопного палива в органічну речовину ґрунту [190].

Оскільки органічна речовина ґрунту містить близько 60% вуглецю, це є визначальним фактором впливу ґрунту на глобальний вуглецевий цикл [100]. Маючи приблизно 1 500 мільярдів тонн вуглецю, що міститься в органічній речовині у ґрунті у всьому світі, ґрунти є другим за величиною активним запасом вуглецю після Світового океану (40 000 мільярдів тонн). У ґрунті зберігається більше вуглецю, ніж в атмосфері (760 мільярдів тонн) та у рослинності (560 мільярдів тонн) разом узятих. Однак, як і при інших кругообігах вуглецю, відбувається постійний перенос вуглецю між ґрунтом та атмосферою і навпаки через рослини. Насправді викиди CO<sub>2</sub> (вуглекислого газу) з ґрунтів в атмосферу приблизно вдсятеро перевищують викиди викопного палива, але в природних умовах це врівноважується подібним потоком в іншому напрямку. Рослини поглинають CO<sub>2</sub> з атмосфери в процесі фотосинтезу і використовують його для побудови своїх коренів, стебел або листя. Вуглець переважно переноситься в ґрунт через викид органічних сполук у ґрунт корінням рослин або через гниття рослинного матеріалу або ґрунтових організмів, коли вони гинуть. Мікробний розпад органічної речовини, нарешті, вивільняє поживні речовини, які рослини використовують для росту. Під час цього процесу розкладання частина вуглецю виділяється у вигляді вуглекислого газу через дихання ґрунту, тоді як інший вуглець перетворюється на стабільні органічні сполуки, які замикаються в землі. Як швидко це відбувається, залежить від факторів, включаючи температуру та кількість опадів, баланс ґрунт-вода та склад органічного матеріалу. Різні джерела органічної речовини розкладаються з різною швидкістю. Якщо додавання нового матеріалу менше швидкості розкладання, органічна речовина ґрунту зменшується, і навпаки, якщо швидкість додавання більша за швидкість

розкладання, органічна речовина ґрунту збільшиться. Однак загалом процес що призводить до втрат вуглецю з ґрунту відбувається швидше і легше, ніж процес відновлення запасів вуглецю. Чи накопичуватимуть або втрачають вуглець ґрунти – і, отже, діючи як поглиначі вуглецю чи джерела вуглецю – залежить від ряду факторів, особливо від використання землі та від кліматичних умов [100]. На додаток до  $\text{CO}_2$ , ґрунти також відіграють важливу роль у балансі інших парникових газів. Викиди оксиду азоту ( $\text{N}_2\text{O}$ ), парниковий газ майже у 300 разів потужніший, ніж  $\text{CO}_2$ , пов'язані з розкладанням органічних речовин та використанням азотних добрив. Метан ( $\text{CH}_4$ ) – парниковий газ, приблизно у 20 разів сильніший за  $\text{CO}_2$ , і виробляється в ґрунтах в анаеробних умовах [191].

Поглинання органічного вуглецю в ґрунті – це процес, за допомогою якого вуглець виводиться з атмосфери через рослини або органічні залишки і зберігається в ґрунті [162,192,193]. Маючи справу з  $\text{CO}_2$ , секвестрація ОРГ включає три етапи: 1) видалення  $\text{CO}_2$  з атмосфери за допомогою фотосинтезу рослин; 2) перенесення вуглецю від  $\text{CO}_2$  до рослинної біомаси; і 3) перенесення вуглецю з рослинної біомаси в ґрунт, де він зберігається у формі ОРГ. Цей пул характеризується найвищим коефіцієнтом обороту (днів – кілька років), охоплює нещодавно включені рослинні залишки і легко розкладається ґрунтовою фауною, як правило, спричиняючи викиди  $\text{CO}_2$  в атмосферу [126,194,195]. Отже, імперативне планування заходів з секвестрації ОРГ вимагає виходу за межі захоплення атмосферного  $\text{CO}_2$  і вимагає пошуку способів утримувати С у повільному пулі ОРГ. Навпаки, дослідження показують, що стабільний пул має незначний потенціал для секвестрації вуглецю завдяки своїй стійкості до змін і, отже, нечутливості до управління [196].

### 1.3. Роль рослин у накопиченні ґрунтового органічного вуглецю та емісії вуглекислого газу

Органічний карбон, що міститься в органічній речовині ґрунту (ОРГ), є найбільшим резервуаром вуглецю на земній кулі. Кількість та якість ОРГ є основним показником, що відображає родючість ґрунту [197–200]. Тому, під час вирощування енергетичних культур в якості енергоносіїв важливу особливість у кругообігові карбону має збереження балансу між відчуженим з енергетичної плантації урожаєм біомаси, та кількістю рослинних решток, що слугуватимуть субстратом для утворення ОРГ [31,201,202]. Органічний карбон, надходить у ґрунт не тільки після відмирання рослин, а і протягом їх життя, так як безперервний процес біодергадації різних частин рослин відбувається протягом всього періоду їх росту і розвитку [190,203–205]. Використання рослинних залишків запобігає водній та вітровій ерозії, посилює інфільтрацію води в ґрунті, а в посушливих умовах сприяє збільшенню запасів вологи підвищує рівень вмісту ОРГ. Чим більше  $\text{CO}_2$  асимілюється рослинами у процесі формування вегетативної маси, тим більше карбону, що використовується культурами переходить в ОРГ [206,207]. Рослинні рештки попереджають непродуктивне випаровування вологи з поверхні ґрунту, скорочують діапазон температурних коливань – гальмують швидкість охолодження восени та прогрівання на весні, знижують промерзання ґрунту у зимовий період, збільшують водопроникність орного шару, сприяють снігозатриманню, попереджують утворення ґрунтової кірки, покращують агрофізичні властивості ґрунту [208–211]. Тому охорону ґрунтового покриву від деградації слід розглядати з одного боку як чинник, що забезпечує збереження природно-енергетичного потенціалу агроєкосистем, а з другого – як елемент, що може в умовах змін клімату опосередковано сприяти підвищенню ефективності використання вологи та депонуванню карбону в ґрунтовому середовищі, тобто зменшувати його емісію в атмосферу, що є одним з чинників адаптування аграрного виробництва до кліматичних змін [212–215]. Процеси утворення, трансформації та стабілізації ОРГ тісно пов'язані із глобальними

змінами клімату [216,217]. Рослинні рештки мають велике значення не лише як фактор накопичення ОРГ, але як і джерело  $\text{CO}_2$  в наслідок їх мінералізації [218–220]. Органічне накопичення  $\text{CO}_2$  відбувається, головним чином через фотосинтез наземними рослинами. При цьому ґрунти розглядають в якості ключового інструменту зниження концентрації  $\text{CO}_2$  в атмосфері [217]. Водночас слід зауважити, що на рослинний покрив припадає найбільша частка асимільованого карбону, який у складі вегетативної маси культур у процесі трансформації накопичується у ґрунтах, у формах, що унеможливають його емісію у вигляді  $\text{CO}_2$ , тобто депонуються [221]. Діоксид карбону атмосфери приблизно на 80–90% має ґрунтове походження, а серед потоків  $\text{CO}_2$ , що надходять до атмосфери, емісія з поверхні ґрунту є однією з найпотужніших [222]. Основним чинником істотного порушення балансу накопиченого карбону в ґрунті та атмосфері у результаті сільськогосподарської діяльності є обробіток ґрунту (зокрема глибока оранка), незбалансоване застосування мінеральних добрив, порушення структури сівозміни тощо, які мають негативний вплив на ґрунтову біоту, що знижує екологічну стійкість і продуктивність агроecosystem та родючість ґрунту [223]. Як нами уже було зазначено, рештки рослин мають винятково особливе значення для відтворення родючості ґрунту з огляду на те, що вони є необхідним компонентом та регулятором мікробіологічних процесів, а використання різних їх видів змінює обсяги емісії  $\text{CO}_2$  в атмосферу. За оцінками експертів, близько 16–30%  $\text{CO}_2$  в атмосфері може бути зменшено в результаті його депонування у ґрунті через збільшення концентрації в органічній речовині ґрунту на 5–15% [224]. Цикл карбону в ґрунті визначається динамічною рівновагою між фотосинтезом, виділенням  $\text{CO}_2$  при розкладанні організмів, а також стабілізацією карбону. Ґрунт зберігає, щонайменше, втричі більше карбону (в органічній речовині) ніж в атмосфері або в рослинах [217]. Одним з найбільш актуальних питань в наш час є тема про шкоду або користь зростання вмісту  $\text{CO}_2$  в атмосфері та його вплив на ріст і розвиток рослин. Зростаючий вміст  $\text{CO}_2$  в атмосфері є причиною посиленого росту рослин і прекрасним добривом для них [225]. Як відомо, вуглекислий газ

є важливою складовою біологічного процесу фотосинтезу у рослин. Листя живляться сонячною енергією спільно з CO<sub>2</sub>, водою і мінеральними речовинами з ґрунту. Тому збільшення вуглекислого газу просто інтенсифікує зростання, надаючи більше газу, ніж потрібно, щоб підгодувати рослини [225]. Тобто деякі проблеми на кшталт підвищення рівня вуглекислого газу частково йдуть на користь рослинам [226]. Як відомо, засвоєння CO<sub>2</sub> рослинами пропорційно залежить від темпів їх зростання. Якщо високорослі сільськогосподарські культури досить забезпечені мінеральним живленням, вологою, а також мають сприятливі умови для процесу фотосинтезу, то вони будуть поглинати дуже багато вуглекислого газу. Рослини за типом фіксації карбону розділені на групи C3, C4 і CAM рослини. C3 є найбільшою групою рослин (97%), в яких вуглекислий газ фіксується безпосередньо з повітря. Рослини з C3-типом фотосинтезу – до яких належить більшість сільськогосподарських культур (пшениця, жито, рис, шпинат, овес, цукрові буряки та інші) здатні засвоїти за одну годину на один квадратний дециметр листової пластинки 30–50 мг CO<sub>2</sub>. Рослини типу C4 (до яких належить енергетичні культури Міскантус гігантський (*Miscanthus × giganteus*), та Просо прутноподібне (*Panicum virgatum* L) можуть успішно поглинати вуглекислий газ навіть при дуже низькій його концентрації, і навіть у дуже спекотну погоду [227]. Вуглекислий газ повітря є субстратом фотосинтезу. Доступність CO<sub>2</sub> і його концентрація визначають активність вуглецевого метаболізму рослин. В повітрі концентрація CO<sub>2</sub> становить 0,03%. Разом з тим встановлено, що максимальна швидкість фотосинтезу досягається при концентрації вуглекислого газу на порядок вище (близько 0,3–0,5%). Таким чином, концентрація CO<sub>2</sub> – це один з обмежуючих факторів фотосинтезу. Лімітуючий вплив концентрації вуглекислого газу особливо проявляється при високих інтенсивностях освітлення, коли фотохімічні реакції виробляють максимально можливу кількість НАДФН і АТФ, необхідних для метаболізму вуглецю в рослині [228]. Збільшення концентрації CO<sub>2</sub> призводить до швидкого зростання інтенсивності фотосинтезу. При концентрації CO<sub>2</sub> 0,06–0,15% у більшості

рослин досягається насичення фотосинтезу. Збільшення концентрації CO<sub>2</sub> одночасно з підвищенням інтенсивності світла приводить до зрушення насичує концентрації CO<sub>2</sub> в область ще більших концентрацій (аж до 0,5%) і до значного збільшення асиміляції вуглецю рослинами. Однак тривале витримування рослин при високих концентраціях вуглекислого газу може привести до «перегодовування» рослин і пригнічення фотосинтезу [229,230].

Для того, щоб ефективно задіяти потенціал і можливості зв'язування атмосферного карбону ґрунтами, слід упроваджувати збалансоване землекористування на системному рівні, що допускає реалізацію низки функцій, які забезпечують спектр екосистемних послуг [106]. Інший варіант – зміна балансу між фотосинтезом екосистеми та обсягом викидів нею діоксиду карбону в результаті збільшення фотосинтезу сільськогосподарськими культурами, використання покривних культур. Значних результатів у відновленні карбонового балансу можна досягти за використання енергетичних культур. Енергетичні культури другого покоління, такі як Міскантус гігантський (*Miscanthus × giganteus*), та Просо прутоподібне (*Panicum virgatum* L) мають високу врожайність біомаси вважаються хорошим альтернативним джерелом енергії, оскільки вони мають високу здатність зменшувати викиди ПГ та пом'якшувати зміни клімату [201,202,231].

На основі аналітичного огляду сучасної наукової літератури, нами ґрунтовано актуальність розв'язання наступних наукових питань: 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.



У розділі 1 використано матеріали з відповідними посиланнями на такі наукові джерела із списку літератури: 4-19, 22-31, 33-37, 42-52, 54-58, 60, 63-66, 69-84, 89-95, 96-146, 148-164, 168-195, 197-215, 217-231,

## Розділ 2.

### МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 2.1. Ґрунтові умови регіону проведення досліджень

Дослідження проводились протягом 2014–2020 рр. на базі «Колекції енергетичних культур» Полтавської державної аграрної академії МОН (Полтавської ДАА). Також окремі дослідження здійснювалися в сертифікованій науковій лабораторії агроекологічного моніторингу Полтавської ДАА. Польові дослідження проводилися в умовах Полтавської області, що територіально відносять до центральної частини України зони Лісостепу та характеризуються різноманітністю ґрунтових умов та помірно-континентальним кліматом. Загальна протяжність території із півночі на південь сягає 213,5 км, із заходу на схід – 245 км. Сільськогосподарські угіддя займають 75,3 %, що свідчить про можливість отримання значного обсягу аграрної продукції при вирощуванні культур. За виробництва валової продукції сільського господарства Полтавська область займає третю позицію, а от за територією – 7 місце в Україні (4,6 % площі), за обсягом виробництва зернових культур займає друге місце [232].

На сьогодні у Полтавській області налічується 53 види ґрунтів з-поміж яких найпоширеніші 12 агровиробничих груп (чорноземи, лучно-чорноземні, дерново-підзолисті, опідзолені, лучні, лучно-болотні, болоті, торфино-болотні, торфовища, дернові, солонці та солоді). Дані ґрунти вирізняються потужним гумусованим профілем (80–120 см), який утворено завдяки щорічному надходженню відмерлих рослинних решток за умов панування лучних степів, а також глибокому проникненню вологи, що перерозподіляла гумус. На Полтавщині найчастіше зустрічаються чорноземи – 64 %. Механічний склад ґрунтів змінюється із заходу до південного сходу – з легкосуглинкових до важкосуглинкових, решта території – середньосуглинкові. Піщані та супіщані знаходяться на першій надзаплавній терасі річок. Середньогумусні відмінності чорноземів поширені на схід від долини Ворскли, а малогумусні – на захід від

неї. Загалом зустрічається близько 8 типів ґрунтів. Ґрунтовий покрив області залежить від існуючого рельєфу. Окрім того, Лісостепова зона Полтавської області відрізняється від інших лісостепових областей наявністю близько третини площі орних земель та сільськогосподарських угідь, що мають засолені ґрунти. Найбільші масиви солонцюватих ґрунтів поширені на півдні області. Вони приурочені в умовах близького залягання ґрунтових вод. Важливими показниками ґрунтів є забезпеченість їх поживними речовинами, до яких відносять гумус ґрунту та основні біогенні елементи (азот, фосфор, калій), які впливають на ріст і розвиток рослин. За результатами агрохімічної паспортизації у 2014 р., більшість ґрунтів агропідприємств Полтавської області (49,2 %) мають середній вміст гумусу та значна частка (37,5 %) – підвищений. Високий і дуже високий рівні характерні для відповідно 10,5 % та 0,7 % обстежених ґрунтів. У середньому в області цей показник досягає 3,33 %. Кількість мікроелементів у ґрунтах місця проведення досліджень достатня для оптимального живлення сільськогосподарських культур. Ґрунти мають найбільший дефіцит у цинку, середньозабезпечені міддю та марганцем та достатньо забезпечені бором [233,234].

Незважаючи на наявність чорноземів та високий вміст гумусу в ґрунтах, в Полтавській області спостерігаються процеси, що зменшують родючість ґрунту. Основними чинниками зниження гумусу є ерозія, інтенсивна мінералізація органічної речовини, некомпенсоване відчуження основних елементів живлення з урожаєм культур. На зниження родючості ґрунтів також впливають процеси деградації земель. Сільськогосподарські угіддя характеризуються слабо та середньодифляційними процесами. Виняток у цьому – Диканський район, який має сильну вітрову ерозію. Зниження родючості ґрунтів унаслідок ерозійних процесів поширене в Чутівському, Решетилівському та Карлівському районах. 749 тис. га сільськогосподарських угідь області зазнають впливу водної та вітрової ерозій (18,3 % та 18,8 % відповідно до загальної площі). Більшість земель (64,2 %) Полтавської області за агрохімічною оцінкою належить до земель підвищеної якості (50–60 балів),

але спостерігається тенденція до її зниження. Територія Полтавської області входить до переліку умовно чистих земель, що дає змогу віднесення земель до спеціальних сировинних зон та вирощування на них органічної продукції. Ґрунтові ресурси є найвагомішою передумовою розвитку сільського господарства та спеціалізації в галузі рослинництва [235,236].

Полтавська область поділяється на 4 зони, які характеризуються певними особливостями [236,237]:

I зона – Західна Лісостепова, в якій переважають чорноземи глибокомалогумусні та здебільшого легко- та середньосуглинисті ґрунти, значну площу займають опідзолені та деградовані, суглинкові ґрунти легко cơханічного складу.

II зона – Східна Лісостепова, більше 50 % зони займають чорноземи мало- та середньогумусні, у центральній та північних частинах – суглинисті ґрунти та опідзолені чорноземи.

III зона – Перехідна-Південна, має рівнинний рельєф, основні ґрунти – чорноземи глибокосередньогумусні, малогумусні легкого або середнього механичного складу, інколи зустрічаються й чорноземи солонцюваті.

IV зона – Південно-Західна, що має більшість ґрунтів – чорноземи глибокі, слабосолонцюваті та залишковосолонцюваті, місцями залягають засолені, лучні й болотні солонцюваті та солончакові ґрунти.

Велику роль у вологозабезпеченості території відіграють її водні ресурси. Територія Полтавської області розташована в межах Придніпровської низовини на лівобережжі басейну річки Дніпра. Місцевість являє собою рівнину, розділену річковими долинами та ярами. Поверхні водойми займають 5,2 % загальної площі області [238]. Таким чином, Полтавська область розташовується на території із сприятливими умовами з агропоказниками близьких до оптимальних для розвитку сільського господарства. Більша її частина належить до сприятливої біокліматичної зони, окрім невеликої північної ділянки, що має її оптимальний рівень [239].

Для формування високої врожайності біомаси, просо прутоподібне

рекомендовано вирощувати на ґрунтах із рівнем кислотності (рН) близькою до нейтральної. На таких ґрунтах рослини ефективно використовують елементи живлення, що необхідні для їхнього росту і розвитку. Небажаними для вирощування проса прутоподібного на землях, що засмічені злаковими бур'янами, знищення яких у посівах досить проблематичне. Якщо на полі, відведеному під закладку енергоплантації проса прутоподібного, є значна кількість багаторічних бур'янів, з осені перед оранкою їх треба знищити внесенням препарату суцільної дії. Отже, ґрунти Полтавської області в цілому придатні для вирощування всіх сільськогосподарських культур, в тому числі і проса прутоподібного [236,240].

## 2.2. Кліматичні умови

Зміна агрокліматичних умов на фоні негативних явищ потребує перегляду спеціалізованих зон насінництва польових та енергетичних культур для одержання високих врожаїв насіння з відмінними посівними якостями. Найбільш сприятливі території для вирощування енергокультур, це ті, де середньорічна кількість опадів становить не менше 420 мм на рік, а оптимальна – понад 550 мм. Поряд з цим, при характеристиці природних умов території України для вирощування сільськогосподарських та енергокультур необхідно враховувати комплекс еколого-кліматичних чинників: коефіцієнт зволоження, вологість клімату, середньорічну температуру повітря, лісистість території та ін.. Рівень зволоження Полтавської області в цілому – нерівномірний: у центральній частині характеризуються недостатнім зволоженням, у південно-східній – посушливими умовами. Полтавська область в цілому поділяється на 4 зони, які характеризуються певними особливостями за температурою та кількістю опадів [236,237].

I зона – Західна Лісостепова, найбільш вологозабезпечена (середня кількість опадів становить близько 550 мм), але менш забезпечена теплом (сума ефективних температур – у межах 2600–2700°).

II зона – Східна Лісостепова з більш посушливим кліматом (середня кількість

опадів становить 508 мм) та вищим тепловим режимом (сума ефективних температур підвищується до 2700–2800°).

III зона – Перехідна-Південна, найбільш посушлива зона (середня кількість опадів становить 480 мм) з найвищим тепловим режимом (сума ефективних температур сягає до 2800–2900°).

IV зона – Південно-Західна, кліматичні показники якої збігаються з показниками Східної Лісостепової зони.

Наші дослідження були розташовані у в межах одного, до яких відносяться метеостанції (МС): МС Полтава.

МС Полтава. Середня річна температура повітря за даними МС Полтава +9.7°, що вище минулого року на 0.7° та вище середньо багаторічного значення на 2.1°. Найхолоднішим був січень з середньою температурою повітря 5.9° морозу, у третій декаді січня відмічалось зниження мінімальної температури повітря до 21.2° морозу. Найтеплішим був серпень з середньою температурою повітря +23.2°, максимум температури повітря був у першій декаді серпня і становив +35.7 градусів. Річна сума опадів склала 443мм, що становить 78% середньо багаторічного значення. За теплий період (квітень – жовтень) випало 199 мм опадів (56% ) [237].

### 2.3. Методика польових та лабораторних досліджень

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 аграрній академії на базі лабораторії агроекологічного моніторингу ПДАА (свідоцтво про атестацію №042-19). Відбір проб ґрунтів на вивчення динаміки емісії С-СО<sub>2</sub> та накопичення С<sub>орг</sub> 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, IDT)», 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, IDT)», які встановлюють основні вимоги щодо виконання відбору проб [241,242].

Ґрунтові зразки відбирали у весняний та осінній період перед початком польових робіт та після їх закінчення на пробних майданчиках розміром 10×10 м (відповідно до вимог ДСТУ ГОСТ 17.4.4.02:2019) спеціальним буром на глибині 0–10 см, у спеціальні одноразові контейнери масою 1 кг, конвертним методом (рис. 2.1), що характеризує усереднений склад об'єкта контролю в даному місці на час відбору, будучи різновидом об'єднаної проби.

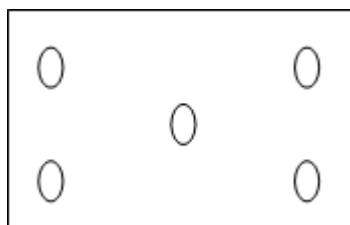


Рис. 2.1. Схема відбору зразків за одинарним конвертом.

Маса точкової проби, призначеної для складання об'єднаної, становила 200 грамів. Проби відбиралися у різних місцях з ДСТУ ГОСТом 17.4.4.02:2019 і ДСТУ ГОСТом 17.4.3.01:2019 у чотирьохразовій повторюваності. Після прикріплення ярлика (місце, дата, глибина відбору, номер проби), для запобігання пошкодження під час транспортування, одноразові контейнери вміщували в картонні коробки. У лабораторії для зменшення об'єму об'єднаної проби використовували метод квартування. Під час відбору проб дотримувалися вимог щодо техніки безпеки згідно з інструкцією нормативного документу.

## 2.4. Методика визначення інтенсивності виділення С-СО<sub>2</sub> ґрунту на ділянках при вирощуванні енергетичних культур

Інтенсивність потоку СО<sub>2</sub> з підстилки, 0–10 см шару ґрунту та вклад в емісію кореневого детриту визначали у відібраних ґрунтових монолітах об'ємом 1500 см<sup>3</sup>, методом вивільнення СО<sub>2</sub> титруванням у статичній системі згідно ДСТУ ISO 16072:2005 Якість ґрунту. Лабораторні методи визначення мікробного дихання ґрунту (ISO 16072:2002, IDT). Визначення емісії СО<sub>2</sub> з поверхні ґрунту проводилась в лабораторії при температурі 22°C (n=4). Доведену до повітряно-сухого стану пробу ґрунту, розім'яту товкачиком за ГОСТ 9147, відібраними включеннями просіяли через сито (діаметр отворів 1 мм) за ГОСТ 3584. Наважку ґрунту масою 200 г зважували з точністю 0,1 г на лабораторних вагах загального призначення 4-го класу з найбільшою границею зважування 500 г за ГОСТ 24104. Отриману наважку поміщали на дно ексикатора об'ємом 1л, який використовували в якості поглинальної системи. Зверху на керамічну підставку розміщували чашку Петрі, в яку попередньо додали 25 мл 0,1 Н NaOH в якості сорбенту СО<sub>2</sub>. Кришки поглинальних судин герметизували за допомогою вазеліну та інкубували протягом 24 год у термостатованому приміщенні при температурі, 22°C + 1°C. Усі вимірювання здійснювали у чотирьохразовій повторюваності.

Після закінчення інкубування, надлишок 0,1 Н NaOH відтитрували в присутності 1% фенолфталеїну 0,1 М розчином НСl. Швидкість вилучення СО<sub>2</sub> обчислюють за формулою [243]:

$$R_{CO_2} = \frac{2,2 * (V_b - V_p)}{24 * m * w} \quad (1)$$

де:

$R_{CO_2}$  – швидкість вилучення СО<sub>2</sub> на масу сухого ґрунту, мг СО<sub>2</sub>\*г<sup>-1</sup>\*год<sup>-1</sup>;

2,2 – коефіцієнт (1 мл 0,1 моль НСl відповідає 2,2 мг СО<sub>2</sub> на день), мг\*мл<sup>-1</sup>\*день<sup>-1</sup>;

$V_b$  – середній об'єм НСl, витраченої на контролі, мл;



$V_p$  – середній об'єм НСІ, витраченої для дослідного зразку, мл;

24 – коефіцієнт перерахунку денного вивільнення в погодинне вивільнення, год\*день<sup>-1</sup>;

$m$  – маса вологого ґрунтового зразку, г;

$w$  – частка сухої маси у вологому ґрунті, %.

## 2.5. Методика визначення накопичення $C_{\text{орг}}$ при вирощуванні енергетичних культур

Інтенсивність накопичення органічного вуглецю від рослинних решток, під час вирощування енергетичних культур визначали оксидиметричним методом за ДСТУ 4289:2004 Якість ґрунту. Методи визначання органічної речовини. Попередньо підготовлену повітряно-суху, просіяну через сито пробу ґрунту, масою 0,3 г та пемзу, яку використовували в якості контрольних («холостих») проб, зважували з точністю 0,1 г на лабораторних аналітичних вагах загального призначення 4-го класу з найбільшою границею зважування 500 г за ГОСТ 24104 та поміщали в сухі термостійкі конічні колби місткістю 100 см<sup>3</sup> типу Кн-1-100-14 згідно ГОСТ 25336. У кожену колбу з бюретки додавали по 25 мл 0,4 Н хромової суміші, після чого закривали скляними лійками діаметром не менше 4 см та круговими рухами перемішували вміст. Підготовлені таким чином всі проби ґрунту з окисником, а також контрольні проби, вміщували у попередньо розігріту до 120 °С шафу і витримували 20-30 хв до закінчення процесу окиснення. Після охолодження зразків, лійки ретельно обмивали дистильованою водою та проводили титрування 0,2 Н розчином солі Мора в присутності 3-5 крапель індикатора 0,2% розчину фенілантранілової кислоти до зміни його забарвлення.

Усі визначення проводилося в трьохразовій повторюваності. Масову частку вуглецю органічної речовини у відсотках ( $\%C_{\text{орг}}$ ) розраховували за формулою:

$$\%C = \frac{(a-b) \cdot n_1 \cdot 0,0003 \cdot 100}{m \cdot n_0} \quad (2)$$

де:

$C$  - вміст вуглецю, %;

$a$  – кількість розчину солі Мора, витраченого на титрування контрольної проби,  $\text{см}^3$ ;

$b$  – кількість розчину солі Мора, витраченого на титрування проби з ґрунтом,  $\text{см}^3$ ;

$n_1$  – нормальність робочого розчину солі Мора,  $\text{г*екв/дм}^3$ ;

$n_0$  – нормальність точного розчину солі Мора,  $\text{г*екв/дм}^3$ ;

$0,0003$  – грамований еквівалент вуглецю, що відповідає  $1 \text{ см}^3$  розчину солі Мора,  $\text{г/см}^3$ ;

$m$  – наважка ґрунту,  $\text{г}$ ;

$100$  – коефіцієнт перерахування, %.

**Показник екологічної стійкості ґрунту (ЕС)** розраховували використовуючи значення інтенсивності емісії діоксиду карбону ( $\text{CO}_2$ ) за формулою:

$$ЕС = |I_1 - I_2| * 100 / I_1, \quad (3)$$

де:

ЕС - екологічна стійкість ґрунту, %;

$I_1$  - інтенсивність респірації  $\text{CO}_2$  з ґрунту цілинної ділянки,  $\text{мг CO}_2/\text{кг ґрунту}$  за добу;

$I_2$  - інтенсивність респірації  $\text{CO}_2$  з ґрунту досліджуваної ділянки,  $\text{мг CO}_2/\text{кг ґрунту}$  за добу.

Для моделювання продуктивності агроєкосистеми використано математичні методи, засновані на розробленні регресійних рівнянь залежності врожайності культур від різних агротехнічних заходів і погодних умов і поєднаному застосуванні регресійних та імітаційних моделей. Для побудови математичної моделі одночасного впливу кількох чинників (незалежних змінних, предикторів) на залежну змінну використовували ускладнений варіант простої лінійної регресії модель множинної лінійної регресії.

Статистичне оброблення отриманих результатів експериментів здійснювали за Б. Доспеховим із використанням комп'ютерних програм.

## 2.6. Методика визначення кількісних показників і урожайності біомаси енергетичних культур

Дослідні ділянки закладено відповідно методики дослідної справи в агрономії, з рандомізованим розміщенням варіантів в чотирикратній повторності з обліковою площею кожної ділянки – 5 м<sup>2</sup>.

Програмою наукових досліджень передбачала наступні етапи:

**На першому етапі** здійснювали відбір проб ґрунту на ділянках проса прутоподібного і міскантусу гігантського здійснювали з кожного повторення (у межах кожної ділянки) методом конверта у весняний період за температури вище 5°C з різних шарів орного шару: 0-10 см, 10-20 см і 30-40 см. масою приблизно 250–300 г.

- **На другому етапі** проводили лабораторні дослідження отриманих ґрунтових зразків для визначення C<sub>орг</sub> оксидиметричним методом, та емісії CO<sub>2</sub> методом інкубації термостаті, протягом 24 при температурі 22°C ± 1°C

- **На третьому етапі** здійснювали статистичний обрахунок отриманих в дослідях з урахуванням дисперсійного та кореляційно-регресійного аналізів за використання ліцензійної комп'ютерної програми «Statistica 6,0»; та моделювання процесу депонування та емісії карбону у багаторічних системах посіву біоенергетичних культур.

Супутні обліки та аналізування ґрунтових зразків та рослинної біомаси проводили за загальноприйнятими методиками:

- визначення агрохімічних показників ґрунту: вміст гумусу в орному шарі ґрунту визначали за Тюріним згідно з ДСТУ 4289-2004; рухомий фосфор і калій в ґрунті – за Чіріковим згідно з ДСТУ 4405:2005; азот, що легко гідролізується, за Корнфілдом згідно з ДСТУ 4729:2007; рН сольове – потенціометричним методом;

- відбір проб ґрунту на ділянках проса прутоподібного і міскантусу гігантського здійснювали з кожного повторення (у межах кожної ділянки) методом конверта у весняний період за температури вище 5°C з різних шарів

орного шару: 0-10 см, 10-20 см і 30-40 см.

- відбір снопового матеріалу рослин проводили напередодні збирання врожаю у чотирьох місцях ділянки. Структурний аналіз кількісних показників рослин проводили згідно «Методика проведення польових та лабораторних досліджень з просом прутоподібним (*Panicum virgatum L.*)»;

- облік рівня врожайності проводили методом поділянкового збору з наступним зважуванням біомаси та перерахунком на 1 га;

- вміст сухої речовини біомаси енергокультур визначали шляхом висушування зразків рослинної сировини до абсолютно сухої маси в сушильній шафі при температурі 100–105 °С упродовж 8 годин, з послідуочим охолодженням, зважуванням проб і відповідним перерахунком на суху масу;

- статистичний обрахунок отриманих в дослідіах здійснювали з урахуванням дисперсійного та кореляційно-регресійного аналізів за використання ліцензійної комп'ютерної програми «Statistica 6,0»;

- економічну ефективність вирощування проса прутоподібного і міскантусу гігантського оцінювали за загальноприйнятою методикою: за витратами на 1 га, умовно чистим прибутком, собівартістю 1 т насіння та рівнем рентабельності виробництва.

У розділі 2 використано матеріали з відповідними посиланнями на такі наукові джерела із списку літератури: 232-240.

### РОЗДІЛ 3.

## ЕКОЛОГО-КЛІМАТИЧНІ РЕЖИМИ ВИРОЩУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР

### 3.1. Температурний режим

Аналіз кліматичних умов вирощування енергетичних культур протягом проведення досліджень дозволив виявити нерівномірність опадів за травень-жовтень. В окремі періоди росту й розвитку рослин фіксували відсутність опадів, що дозволило оцінити реакцію рослин на стійкість до посухи. Відмічено також періоди надмірного зволоження на фоні підвищених температур, що дало можливість визначити стійкість рослин до різких коливань погодних умов (табл. Д.1, рис. 3.1). Найменша середньодекадна температура була встановлена для листопада 2020 року ( $-4.6^{\circ}\text{C}$ ), а найбільша – для серпня 2017 року ( $27.3^{\circ}\text{C}$ ). Кліматична весна (час, коли середня температура перевищує  $0^{\circ}\text{C}$ ) 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)  $^{\circ}\text{C}$ . Річний хід температур характеризується подібністю рік від року, на що вказують високий рівень кореляції між роками (табл. 3.1). Найбільший рівень кореляції встановлений між 2019 та 2017 та між 2019 та 2018 роками. Найменший рівень кореляції встановлений між 2018 та 2020 роками. 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 повільним. Відповідно, інші роки займають проміжне положення у градієнті часу настання весни та різкості зростання температури навесні. Слід відзначити, що ці міжрічні кліматичні особливості мають велике значення для формування фенології росту рослин, а також для забезпечення їх необхідною кількістю вологи, так як швидкість

випарування вологи з ґрунту також залежить від температури.

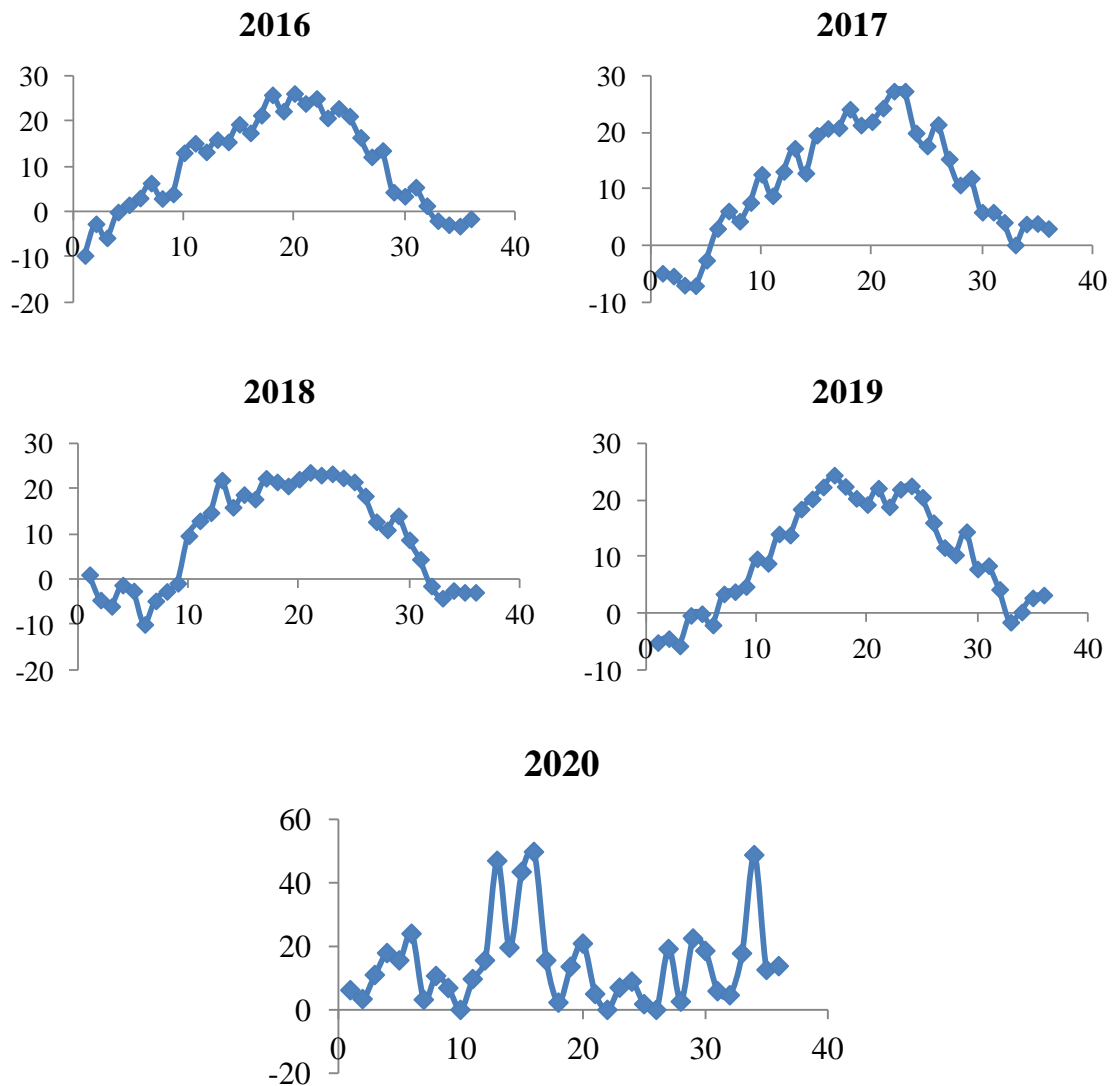


Рис. 3.1. Річний хід температур у районі досліджень. Ось абсцис – порядок декад з початку року, ось ординат – середня за декаду температура, °С

Таблиця 3.1. Кореляційна матриця між річним ходом температур (показані статистично вірогідні коефіцієнти кореляції для  $p < 0.05$ )

	2016	2017	2018	2019	2020
2016	1.00	0.94	0.92	0.94	0.93
2017	0.94	1.00	0.91	0.95	0.92
2018	0.92	0.91	1.00	0.95	0.91
2019	0.94	0.95	0.95	1.00	0.92
2020	0.93	0.92	0.91	0.92	1.00

### 3.2. Режим опадів

Сумарна кількість опадів за рік варіювала у діапазоні від 402.9 мм (у 2019 р.) до 798.9 мм ( у 2016 р.). (табл. Д.2, рис. 3.2).

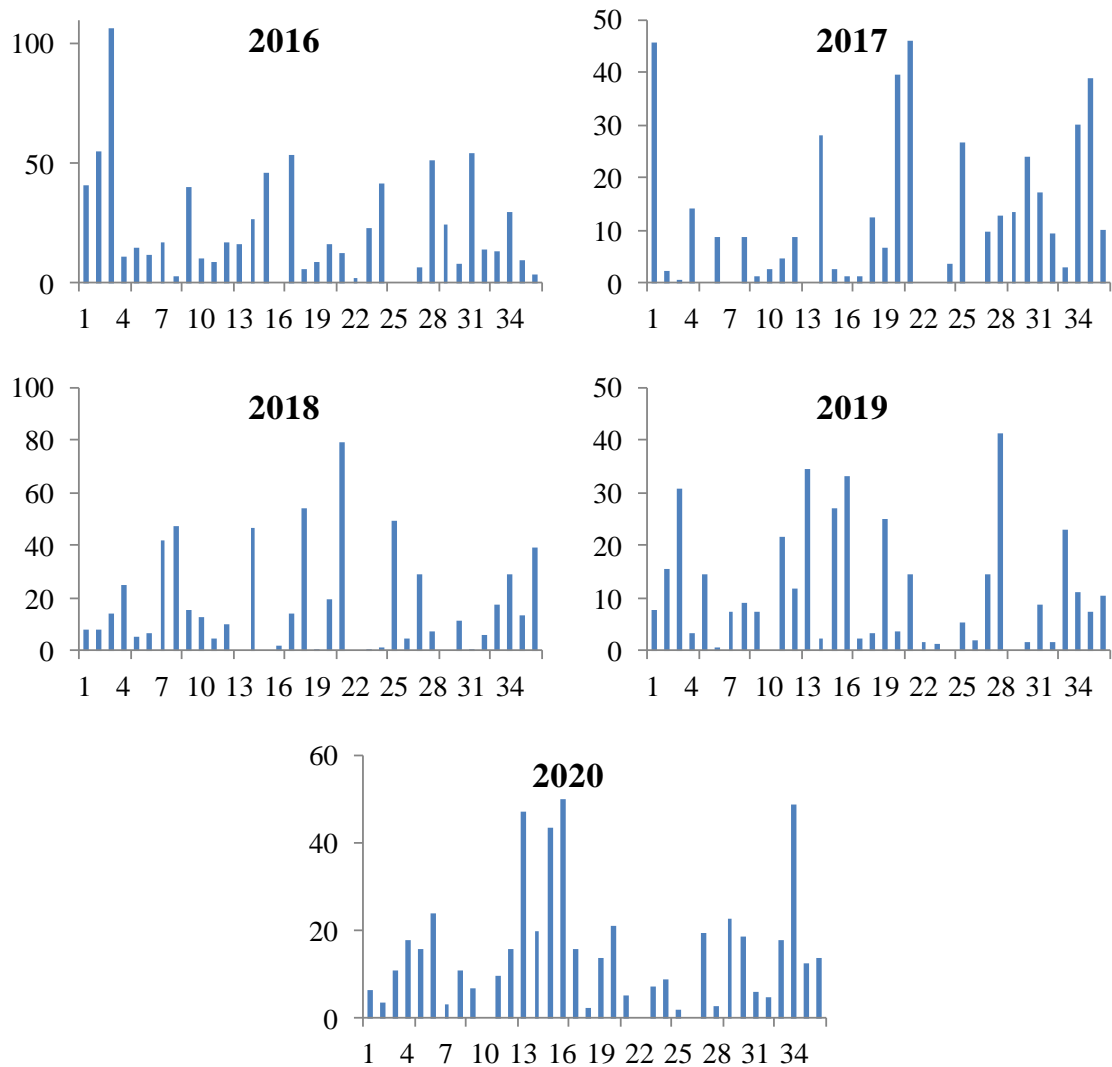


Рис. 3.2. Річний хід випадіння опадів у районі досліджень. Ось абсцис – порядок декад з початку року, ось ординат – сума за декаду опадів, мм

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.

Річний хід випадіння опадів є дуже специфічним, що підтверджується кореляційним аналізом. Подібний характер опадів, який підтверджується статистично вірогідними кореляційними коефіцієнтами, встановлено для 2017 та 2018 років та для 2019 та 2020 років. У свою чергу, 2016 рік не корелював за режимом поадів ні з яким іншим з досліджених.

Таблиця 3.2. Кореляційна матриця між річним ходом опадів (показані статистично вірогідні коефіцієнти кореляції для  $p < 0.05$ )

	2016	2017	2018	2019	2020
2016	1.00	–	–	–	–
2017	–	1.00	0.44	–	–
2018	–	0.44	1.00	–	–
2019	–	–	–	1.00	0.39
2020	–	–	–	0.39	1.00

В умовах 2016 року за 1–2 декаду квітня випало практично рівнозначна кількість опадів (9-10 мм). Спостерігалось збільшенням їх кількості на 3 декаду, що у середньому за місяць становило 12,0 мм. У травні відмічено значне збільшення опадів – від 16,5 до 46,1 мм (середнє за місяць – 29,8 мм). За подальшої вегетації фітоценозу проса прутоподібного, на початку червня фіксували відсутність опадів, в 2 декаді червня випало 53,7 мм, а у 3 декаді відмічали значне зниження даного показника до 5,4 мм. Протягом 1 та 2 декади липня за кількістю опадів була на рівні 8,9–16,5 мм відповідно, та уже в 3 декаді липня було значне зменшення кількості опадів на 4,4 мм в порівнянні з 2 декадою. У 1 декаді серпня кількість опадів була на рівні 1,7 мм, а от у 2 та 3 декадах спостерігалось значне збільшення кількості опадів (22,5 і 41,4 мм відповідно). На 1 та 2 декади вересня відмічено відсутність опадів, тільки у 3 декаді вересня була не значна їх кількість. У порівнянні із



середньо- багаторічними значеннями за вересень випало на 8,9 мм менше. У 2017 році за 1-2 декаду квітня кількість опадів була незначною – на рівні 2,6 і 4,6 мм відповідно. А от у 3 декаді квітня цей показник дещо збільшився до 8,7 мм. На початку травня не було опадів, значне збільшення опадів відмічали в 2 декаді травні та різке їх зменшення у 3 декаді (від 28,0 мм до 2,6 мм). У порівнянні із середньо багаторічними значеннями кількість опадів за травень була менше на 5,1 мм.

Червень місяць, за кількістю опадів значно різнився в порівнянні з 2016 роком оскільки 1 та 2 декада за кількістю опадів була в межах 1,3-1,1 мм, а в декаді відмічали збільшення опадів в порівнянні з минулим роком на 6,9 мм. У 1-й декаді липня кількість опадів була на рівні 6,7 мм, у 2 та 3 декаді місяця було значне збільшення кількості опадів до 39,5 і 46,0 мм відповідно. Відмічено, що 1 та 2 декада серпня була без опадів, лише в 3 декаді було незначне їх збільшення до 3,7 мм. У 1 декаді вересня кількість опадів значно відрізнялась від 2016 року, оскільки була на рівні 26,5 мм, друга ж декада була без опадів, як і минулого року, та тільки у 3 декаді вересня випала незначна їх кількість (9,6 мм). У порівнянні із середньобагаторічними значеннями кількість опадів за вересень була більше на 1 мм.

Умови 2018 року за кількістю опадів були значно посушливішими в порівнянні з 2016 та 2017 роками, оскільки вже під час відновлення вегетації в 2018 році середня кількість опадів за місяць становила 3,3 мм. У травні відмічено збільшення опадів – від 3,7 до 24,0 мм у 1 та 2 декадах відповідно. При цьому в 3 декаді опадів незафіксовано, а тому середня кількість опадів за місяць була на рівні 9,2 мм. Червень місяць, в порівнянні із середньо-багаторічними значеннями мав кількість опадів менше на 13,4 мм. 1 декада липня за кількістю опадів була на рівні 1,0 мм, а уже у 2 декаді липня було значне збільшення кількості опадів до 31,4 мм. У середньому за місяць випало 16,0 мм, що менше від середньо багаторічних значень на 6 мм. На початку серпня (1 декада) кількість опадів була на рівні 0,7 мм, у 2 декаді – 2,5 мм, та в 3 декаді опадів не було. У вересні випало в середньому за місяць 17,7

мм, що більше в порівнянні із середньобагаторічними значеннями кількості опадів.

В умовах 2019 року за 1 декаду квітня опади були відсутні, у 2 декаді суттєво збільшилась до 26,0 мм, та в середньому за місяць становила 9,5 мм. У травні відмічено значне збільшення опадів у першій декаді до 49,6 мм, різке зниження у другій – до 7,6 мм, та знову різке збільшення до 73,5 мм, що в середньому за місяць дорівнювало 43,6 мм. Перша декада червня за кількістю опадів була найбільшою (61,6 мм), 2 – без опадів, а третя – на рівні 1,1 мм. Відмічено, що опади 1 та 2 декади липня були на рівні 5,6 і 4,3 мм, у 3 декаді спостерігалось збільшення опадів до 46,4 мм. В середньому за місяць кількість опадів була на рівні 18,8 мм, що в порівнянні із середньобагаторічними значеннями була менше на 3,2 мм. У 1 декаді серпня кількість опадів була на рівні 11,0 мм, у 2 декаді зменшилася до 3,3 мм, а вже в 3 декаді опадів не зафіксовано. У порівнянні із середньобагаторічними значеннями кількість опадів за серпень була менше. У вересні середня кількість опадів становила 9,9 мм, що менше середньобагаторічного значення. Визначено, що середньодобова температура повітря протягом років вегетації проса прутіподібного була нерівномірною та мала відхилення від середньобагаторічних показників у сторону збільшення.

Характеризуючи погодні умови вегетаційного періоду за травень-жовтень, відмічаємо, що середня температура повітря, порівняно із середньобагаторічним показником, була більшою, а опадів випадало в окремі періоди менше або більше від середньобагаторічних значень. Також звертаємо увагу, що опади, які випали, розподілилися вкрай нерівномірно на протязі усього вегетаційного періоду. Погодні умови кінця квітня-початку травня місяця були сприятливими. Температура ґрунту на глибині 10 см в цей період була більшою  $10^{\circ}\text{C}$ , а перед посівом відмічалось випадання опадів. Що стосується дощів, то вони були малої інтенсивності, що не призвело до заплівання ґрунту і утворення ґрунтової кірки. Хоча в цілому за травень місяць випало в окремі роки значна кількість опадів, інколи – значно менше

середньо багаторічного значення. Особливо багатими на опади були червень та липень місяці. Так, в червні за середньобагаторічного значення 87,0 мм випало 92,0 мм опадів, а в липні місяці при 92,0 мм недобір склав всього 10,7 мм. Показники температурного режиму в цей період були вищими на 1,5<sup>0</sup>С та 3,5<sup>0</sup>С від середньо багаторічних показників. Наступні місяці вегетаційного періоду – серпень та вересень – за рівнем опадів були протилежними двом попереднім. В серпні місяці випало всього 3,3 мм, а в вересні 1,0 мм опадів, недобір в порівнянні з середніми багаторічними даними складав 64,7 мм та 45,0 мм. Температура повітря в цей період була на 2,2 і 2,7<sup>0</sup>С вищою від середніх показників. Жовтень місяць був дощовим, випала практично двомісячна норма опадів – при 30,0 мм випало 72,3 мм. Температура повітря була вищою від середньо багаторічних показників на 0,5 °С. Для активного росту та розвитку рослин температура впродовж періоду вегетації має бути в межах 15–35<sup>0</sup>С, а вегетаційний період – досить тривалим. Якщо температура нижче 15<sup>0</sup>С або перевищує 35<sup>0</sup>С, вегетація рослин сповільнюється або припиняється. За оптимальних умов зволоження підвищується кустистість рослин.

Отже, погодні умови вегетаційного періоду років дослідження були задовільними для отримання сходів і нормального росту та розвитку рослин. Основна вимога при цьому була – боротьба з бур'янами в початковий період росту й розвитку енергокультури. Згодом, рослини самі є добрими конкурентами в боротьбі за світло та поживні речовини. Це відбувалося за рахунок інтенсивного розростання фітоценозу та змикання міжрядь.

### 3.3. Динаміка гідротермічного коефіцієнту

Загалом кліматичні умови в роки проведення досліджень були контрастними, з відхиленням від середньобагаторічних показників в окремі періоди росту і розвитку рослин міскантусу гігантського та проса прутоподібного. Це дозволило об'єктивно оцінити реакції досліджуваних сортозразків на погодні умови вирощування за гідротермічним коефіцієнтом

(ГТК) та визначити їх адаптивні властивості сортозразків (рис. 3.3).

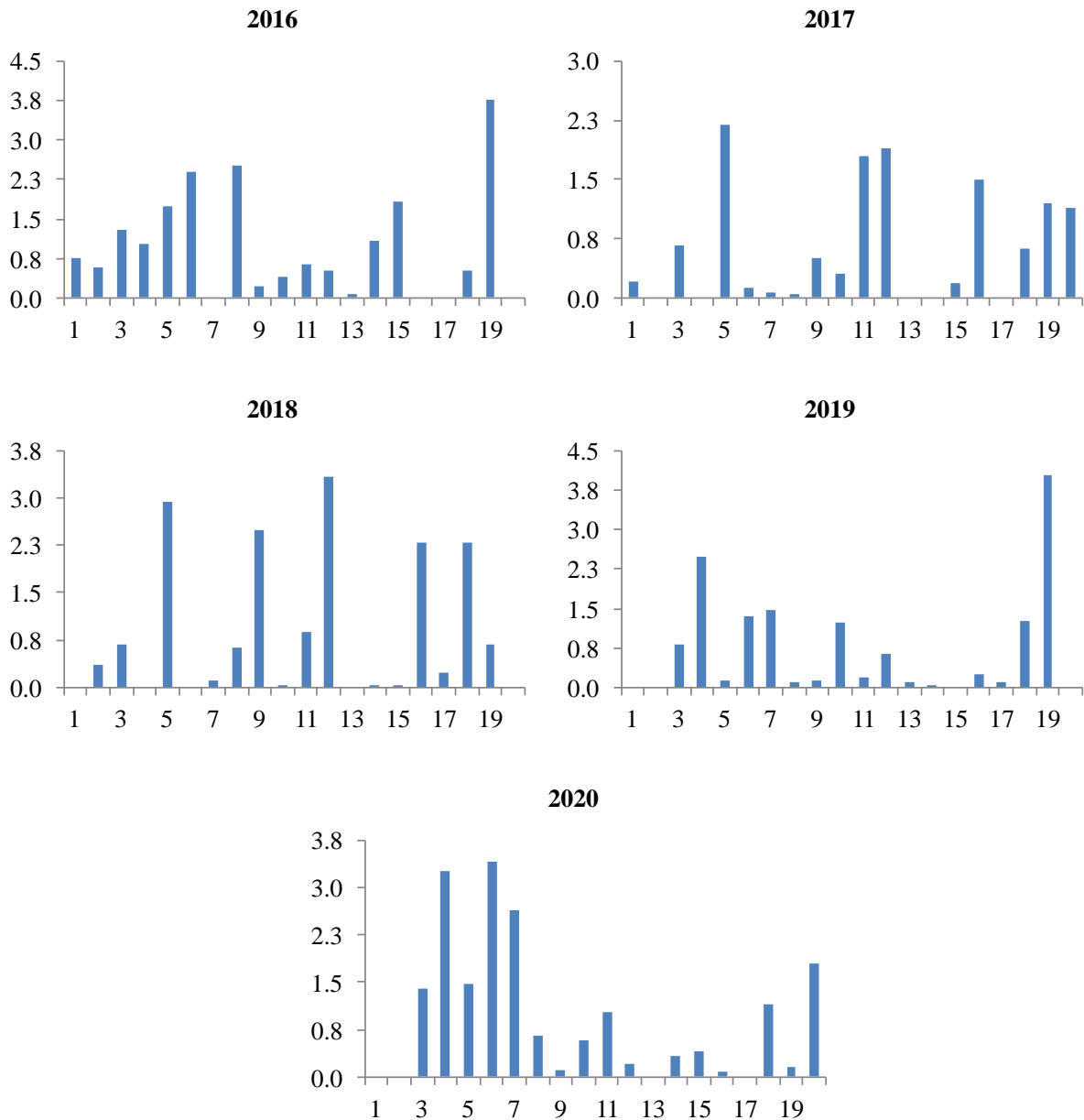


Рис. 3.3. Річна динаміка гідротермічного коефіцієнту Селянінова протягом періоду вегетації проса прутноподібного та Міскантусу гігантського, 2016–2020 рр. Ось абсцис – порядок декад, починаючи з 1 декади квітня, ось ординат – гідротермічний коефіцієнт Селянінова

У зоні недостатнього зволоження (центральна частина Лісостепу) ГТК за період вегетації змінювався у межах – від 0 до 4,02. Найменш сприятливими (посушливими) погодні умови були протягом вегетаційного періоду 2017 р. Посуха відбувалась значний час протягом вегетації рослин (2

квартал квітня, 1 та 3 квартал травня, черень, серпень). Досить екстремальні умови також були в 2019 році. Значну частину року умови були посушливі.

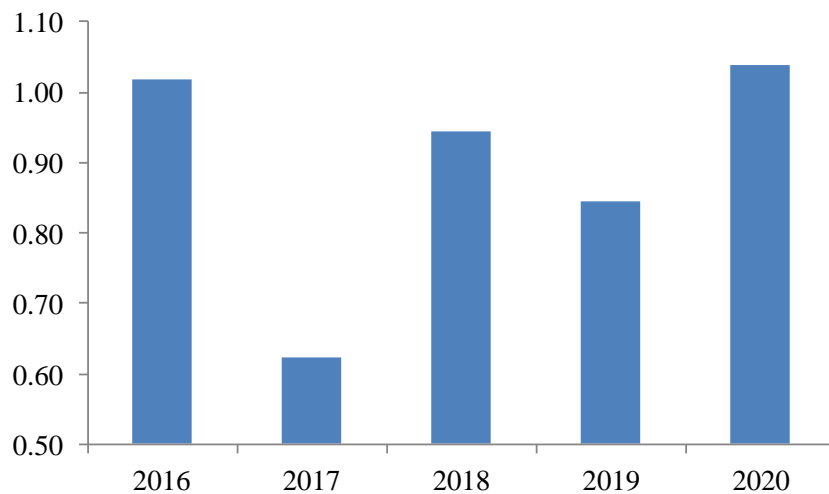


Рис. 3.4. Середньорічні значення гідротермічного коефіцієнту Селянінова протягом періоду вегетації проса прутоподібного та Міскантусу гігантського, 2016–2020 рр. Ось абсцис – роки, ось ординат – гідротермічний коефіцієнт Селянінова

Близькі до оптимального значення за ГТК погодні умови були у 2016, 2020 та у 2018 (ГТК близький до 1) (рис. 3.4). Отже, ґрунтово-кліматичні умови за температурним чинником та кількістю опадів, місця проведення досліджень відповідають біології багаторічних злакових трав. За роками погодні умови були нерівномірними: посушливі умови були у 2017 і 2019 рр., близькими до оптимальних умови були у 2016, 2018 та у 2020 роках.

#### Висновки за розділом

1. Середня річна температура за період досліджень варіювала в межах від 9,3 до 10,8°C. Головною причиною подібності або відмінності між роками за показником річного ходу температур є час настання кліматичної весни. Рання весна супроводжується повільним зростанням температури, тоді як пізня весна супроводжується стрімким зростанням температури.

2. Сумарна кількість опадів за рік варіювала у діапазоні від 402.9 до 798.9 мм. Випадіння максимальної кількості опадів протягом року є дуже нерівномірним та малоповторюваним рік від року. За період досліджень декади без опадів спостерігалися 10.6 % часу.

3. 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.

## РОЗДІЛ 4

### ІНТЕНСИВНІСТЬ ЕМІСІЇ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ТИПУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР

#### 4.1. Описові статистики емісії оксиду вуглецю

Інтенсивність емісії вуглекислого газу ґрунтом, під час проведення досліджень коливалась в дуже широких межах, що свідчить про вплив неоднорідних умов для їх перебігу (табл. 4.1). В цілих умовах (контроль) емісія оксиду вуглецю варіює у межах від 50.7 до 110.6 мг/кг/год (рис. 4.1). Діапазон варіювання цього показнику становить 74.7 мг/кг/год.

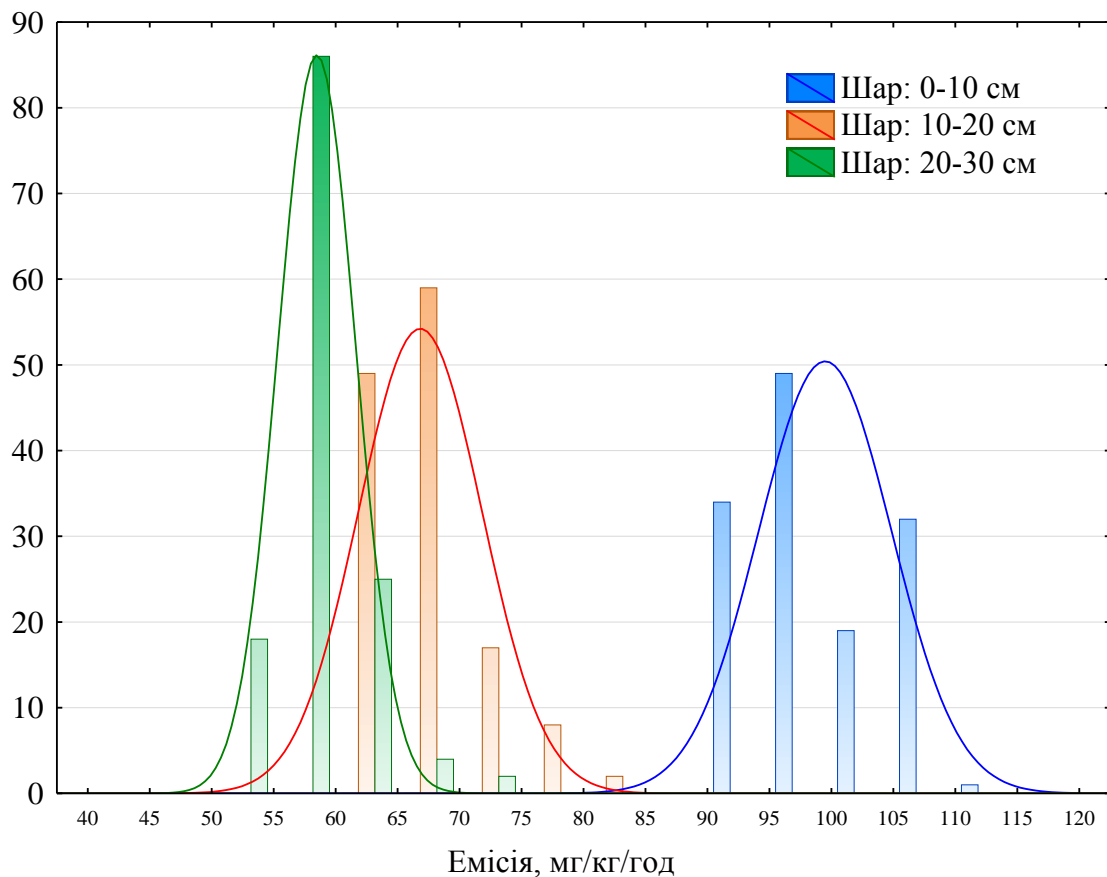


Рис. 4.1. Статистичний розподіл емісії оксиду вуглецю у контрольних умовах (цілина). Ось абсцис – емісія CO<sub>2</sub>, мг/кг/год; ось ординат – кількість спостережень

Рис. 4.1. Емісія CO<sub>2</sub> мг/кг/год для культур різного року вегетації на різних глибинах ґрунту (N = 15)

Веgetаційний рік	Варіант	Шар	2018			2019			2020		
			Середня± ст.помилка	Мінімум	Максимум	Середня± ст.помилка	Мінімум	Максимум	Середня± ст.помилка	Мінімум	Максимум
3	Цілина	0-10 см	97.22±1.17	91.21	106.21	105.56±0.62	101.08	110.62	105.42±0.51	101.41	108.38
		10-20 см	64.59±0.71	60.64	69.48	74.33±1.31	68.12	82.91	73.65±0.80	70.05	79.67
		20-30 см	57.74±0.51	53.49	60.25	57.13±0.90	50.73	61.26	64.03±1.00	59.43	71.08
	Світчграс	0-10 см	127.97±1.97	118.75	142.55	158.21±0.57	154.86	161.26	187.30±0.78	181.23	191.23
		10-20 см	87.15±0.59	83.43	90.81	141.41±0.55	138.62	144.89	156.00±0.46	152.17	158.41
		20-30 см	53.89±2.02	40.53	63.65	111.95±0.97	106.59	118.29	126.03±0.47	123.09	129.64
	Міскантус	0-10 см	167.15±0.68	162.51	172.54	173.96±0.64	168.59	178.81	224.07±0.89	218.96	228.56
		10-20 см	110.88±1.56	101.41	120.41	153.29±0.51	150.21	157.01	158.98±0.53	156.01	162.36
		20-30 см	76.64±0.73	72.35	81.51	136.96±0.95	128.45	145.55	133.66±1.07	128.01	139.87
4	Цілина	0-10 см	97.22±1.17	91.21	106.21	97.22±1.17	91.21	106.21	97.22±1.17	91.21	106.21
		10-20 см	64.59±0.71	60.64	69.48	64.59±0.71	60.64	69.48	64.59±0.71	60.64	69.48
		20-30 см	57.74±0.51	53.49	60.25	57.74±0.51	53.49	60.25	57.74±0.51	53.49	60.25
	Світчграс	0-10 см	146.67±1.25	140.62	155.40	165.17±0.74	160.23	170.01	204.62±1.51	194.87	210.96
		10-20 см	131.72±1.39	123.49	139.74	142.84±0.86	138.42	148.67	152.31±0.40	150.18	154.63
		20-30 см	63.92±1.08	56.23	69.56	112.96±0.32	110.94	115.21	125.23±0.35	123.54	127.69
	Міскантус	0-10 см	172.57±2.39	156.11	184.59	171.74±0.44	168.67	174.87	228.87±0.60	224.41	232.41
		10-20 см	136.86±0.75	131.74	141.81	151.78±0.67	146.59	155.52	163.99±0.72	159.49	168.91
		20-30 см	78.92±0.69	74.23	84.56	136.54±0.86	130.38	141.96	139.50±0.62	135.91	143.29
5	Цілина	0-10 см	97.22±1.17	91.21	106.21	97.22±1.17	91.21	106.21	97.22±1.17	91.21	106.21



Вегетаційний рік	Варіант	Шар	2018			2019			2020		
			Середня± ст.помилка	Мінімум	Максимум	Середня± ст.помилка	Мінімум	Максимум	Середня± ст.помилка	Мінімум	Максимум
		10-20 см	64.59±0.71	60.64	69.48	64.59±0.71	60.64	69.48	64.59±0.71	60.64	69.48
		20-30 см	57.74±0.51	53.49	60.25	57.74±0.51	53.49	60.25	57.74±0.51	53.49	60.25
	Світчграс	0-10 см	157.20±1.97	144.81	167.41	170.08±0.54	165.71	172.94	216.81±0.77	210.56	220.56
		10-20 см	132.57±0.40	130.51	135.41	147.96±0.70	142.95	151.91	156.30±0.69	152.32	160.89
		20-30 см	71.52±1.23	64.25	78.26	119.86±1.02	113.12	125.68	129.99±0.71	125.12	134.86
	Міскантус	0-10 см	248.13±0.71	243.11	252.11	177.68±0.58	175.19	182.15	279.14±6.20	244.37	298.08
		10-20 см	197.13±3.72	182.14	217.55	152.64±0.53	148.99	155.91	164.75±0.52	161.32	168.14
		20-30 см	82.96±0.68	78.04	86.39	138.25±0.66	132.93	141.87	145.49±0.64	140.53	148.87

Найбільший рівень емісії оксиду вуглецю під ціліною встановлений у шарі ґрунту 0–10 см, який дорівнює  $99.2 \pm 0.46$  мг/кг/год та знаходиться в діапазоні від 91.2 до 110.6 мг/кг/год. У шарі ґрунту 10–20 см інтенсивність емісії менша на 32.8 %, ніж у шарі 0–10 см, та становить  $66.7 \pm 0.43$  мг/кг/год у діапазоні від 60.6 до 82.9 мг/кг/год. У шарі ґрунту 20–30 см емісія оксиду вуглецю знижується ще більше. Вона менша, ніж у шарі 0–10 см на 41.2 % та менша, ніж у шарі 10–20 см на 12.6 %. У шарі ґрунту 20–30 см емісія оксиду вуглецю становить  $99.2 \pm 0.46$  мг/кг/год та знаходиться в діапазоні від 91.2 до 110.6 мг/кг/год.

Під насадженнями світчґрасу емісія оксиду вуглецю варіює у межах від 40.5 до 220.6 мг/кг/год (рис. 4.2). Діапазон варіювання цього показнику становить 180.0 мг/кг/год.

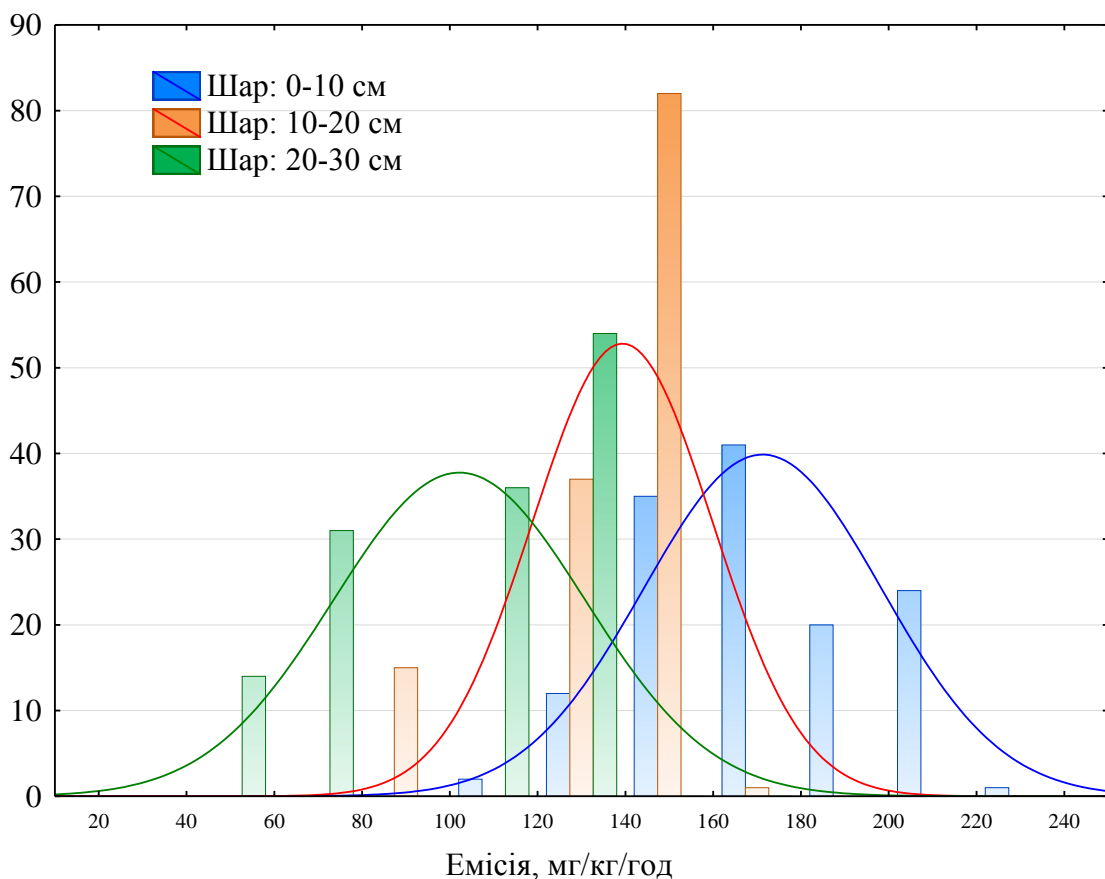


Рис. 4.2. Статистичний розподіл емісії оксиду вуглецю під насадженням світчґрасу. Ось абсцис – емісія  $\text{CO}_2$ , мг/кг/год; ось ординат – кількість спостережень

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 (рис. 4.3). Діапазон варіювання цього показнику становить 225.7 мг/кг/год.

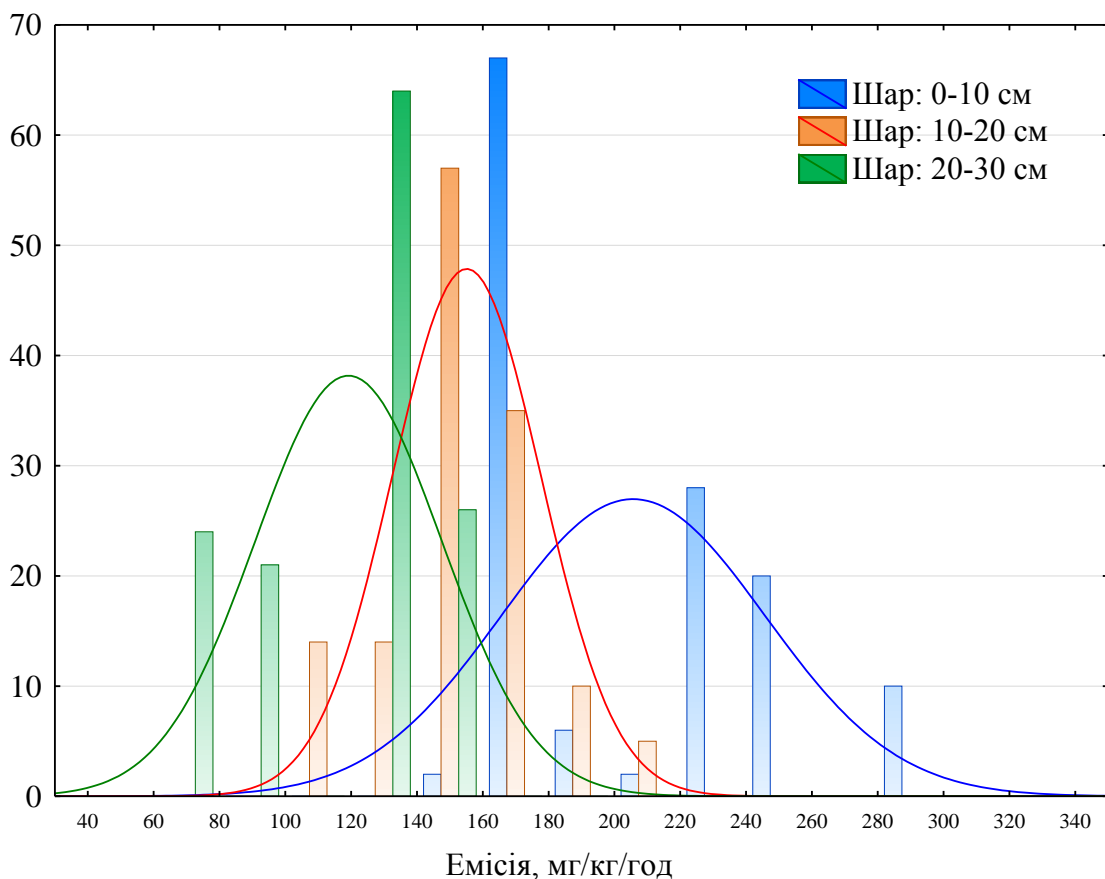


Рис. 4.3. Статистичний розподіл емісії оксиду вуглецю під насадженням міскантусу. Ось абсцис – емісія  $\text{CO}_2$ , мг/кг/год; ось ординат – кількість спостережень

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. В умовах першого року досліджень енергетичних культур, емісія  $\text{CO}_2$  на площах зайнятих різнотрав'ям, що слугували умовним контролем, у шарі ґрунту 0–10 см становила 97,22 мг/кг/год. Цей показник поступово зменшувався із збільшенням глибини відбору ґрунтових проб до рівня 64,59 мг/кг/год., на глибині 10–20 см та 57,74 мг/кг/год. на глибині 20–30 см. Концентрація  $\text{CO}_2$  протягом першого року досліджень енергетичних культур 3–5 року вегетації, була неоднорідною. Значні зміни спостерігалися в динаміці емісії  $\text{CO}_2$  між культурами третього року вегетації на глибині 0–10 см. Найбільша кількість вивільненого вуглекислого газу була характерна для Міскантусу гігантського і становила 167,15 мг/кг/год., що на 76% більше ніж у контролі і на 58% більше порівняно з емісією ґрунту під Просом прутоподібним. Подібна динаміка спостерігалась на ділянках енергетичних культур 4-го та 5-го року вегетації. Інтенсивність емісії  $\text{CO}_2$  була більшою у верхньому ґрунтовому шарі 0–10 см. Динаміка найвищої емісії вуглекислоти лінійно спостерігається на ділянках Міскантусу гігантського і становила 172,57 мг/кг/год для 4-го року вегетації та 248,13 мг/кг/год для 5-го року, що на відповідно більше на 52% та 67% порівняно з рослинами на ділянці 3-го вегетаційного року. Порівнюючи емісію вуглекислого газу на глибині 10–20 см, можна констатувати, що найменший показник характерний для ділянок умовного контролю зайнятих різнотрав'ям і становить 64,59 мг/кг/год, для ділянок, де зростають Міскантус гігантський (*Miscanthus × giganteus*), та Просо прутоподібне (*Panicum virgatum* L)

характерне збільшення виділення вуглекислоти з 87,15 мг/кг/год до 110,88 мг/кг/год. відповідно. Аналогічна ситуація постерігається і для ділянок 4-го та 5-го років вегетації. На глибинні 20–30 см протягом першого року відбору, на ділянках різного вегетаційного періоду суттєвих відмінностей не спостерігалось, що пов'язано з низьким ступенем газообміну у нижніх шарах ґрунту та у середньому в перший рік досліджень в умовах.

#### 4.2. Порівняльний аналіз внеску різних факторів у варіювання емісії оксиду вуглецю з ґрунту

Культура, глибина шару ґрунту, рік та рік вегетації визначають 95 % варіювання емісії оксиду вуглецю ґрунтом (табл. 4.2).

Таблиця 4.2. 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	–	–

Культура є статистично вірогідним предиктором швидкості емісії оксиду вуглецю та здатна пояснити 49.0 % варіювання цього показника (рис. 4.4).

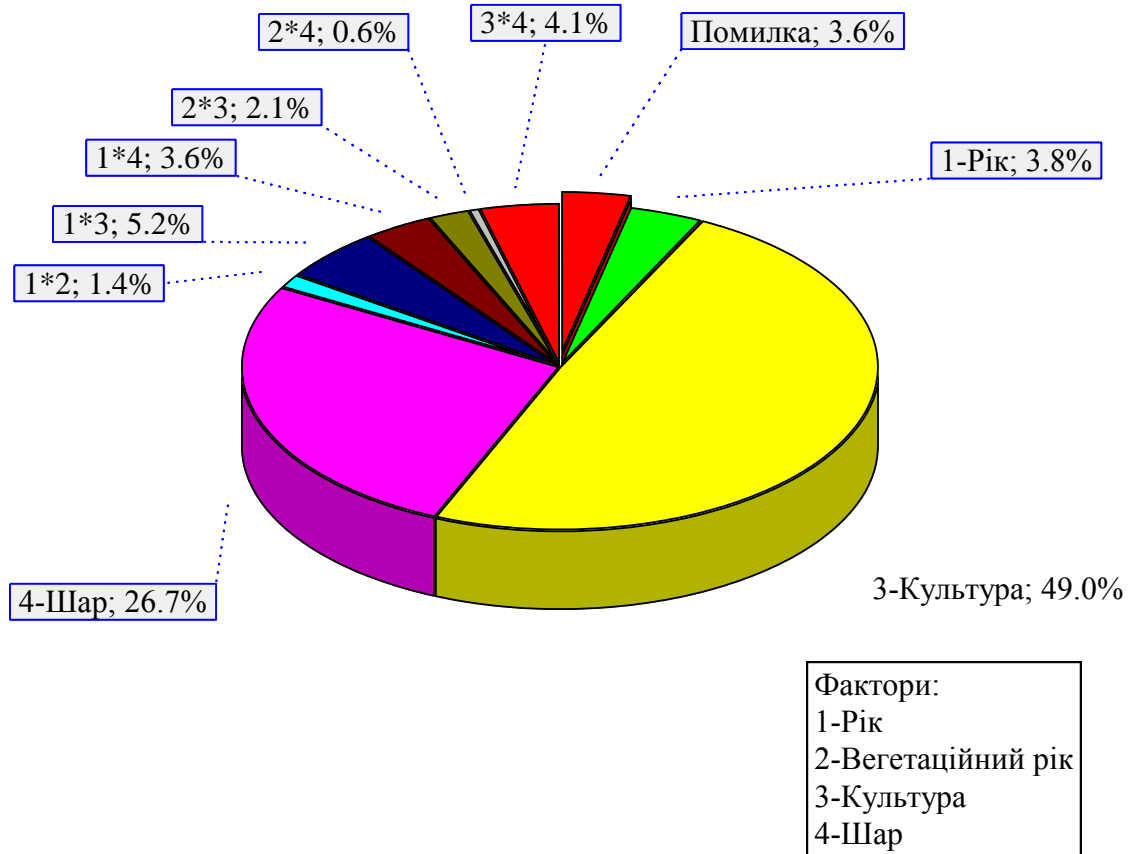


Рис. 4.4. Внесок впливу культури, глибини шару ґрунту, року та року вегетації, а також їх взаємодії у варіацію емісії оксиду вуглецю ґрунтом

Ґрунт під цілинною рослинністю характеризується найменшим рівнем виділення оксиду вуглецю (у середньому становить  $74.70 \pm 0.90$  мг/кг/год) (рис. 4.5). 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 ( $F = 6067.9$ ,  $p < 0.001$ ). 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 ( $F = 785.6$ ,  $p < 0.001$ ).

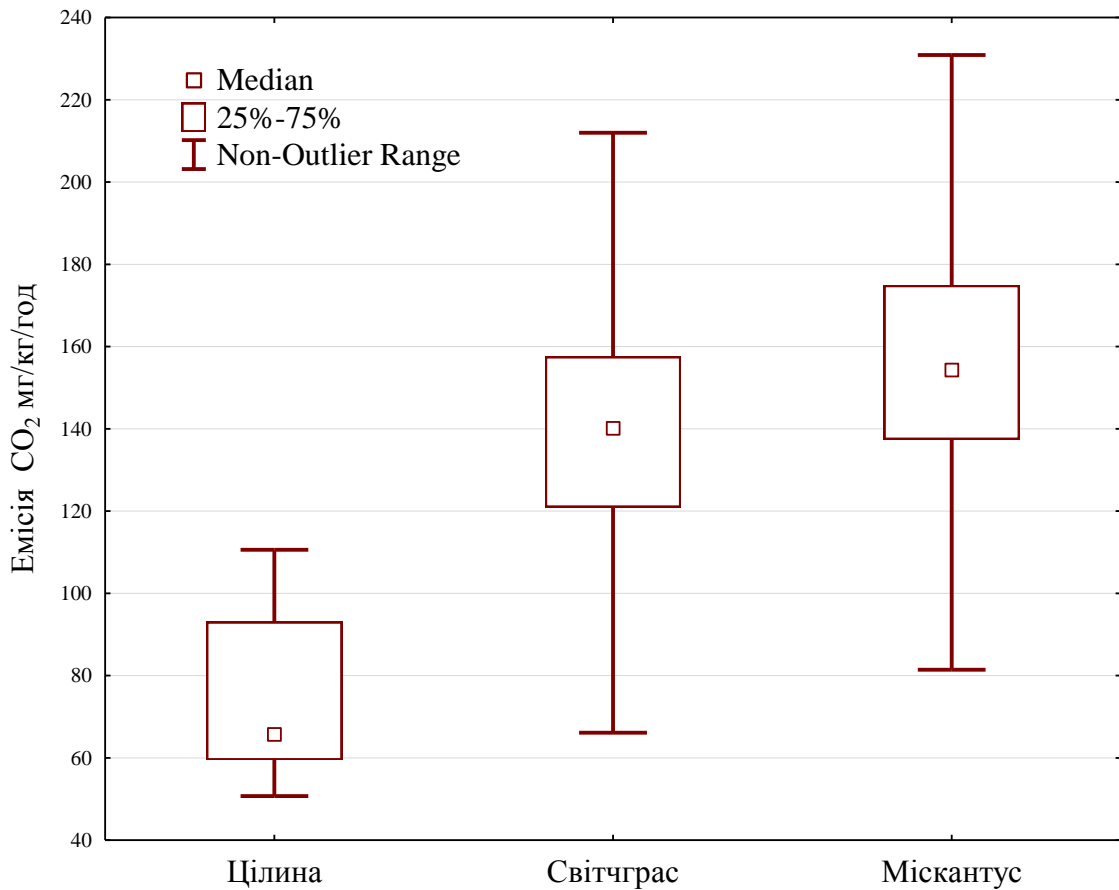


Рис. 4.5. Залежність емісії оксиду вуглецю від культури.

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 2019 році (рис. 4.6). 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 (рис. 4.7). 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 ( $F = 21.3, p < 0.001$ ).

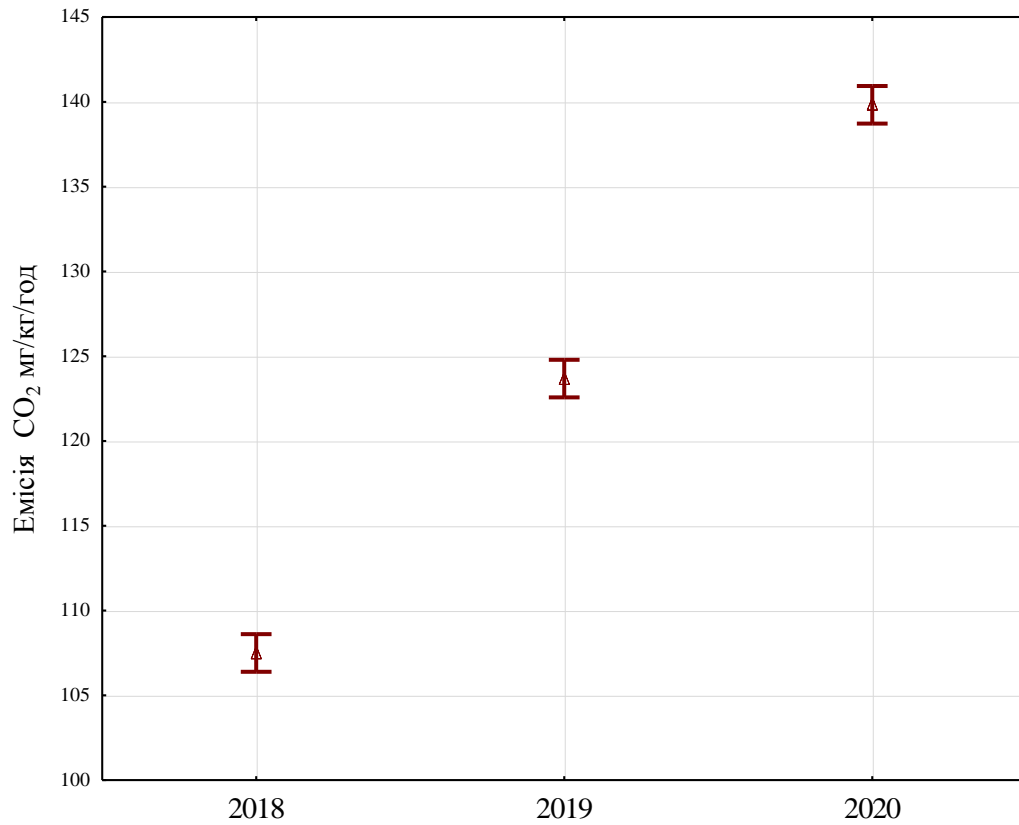


Рис. 4.6. Залежність емісії оксиду вуглецю від року (вертикальні лінії вказують на 95%-й довірчий інтервал)

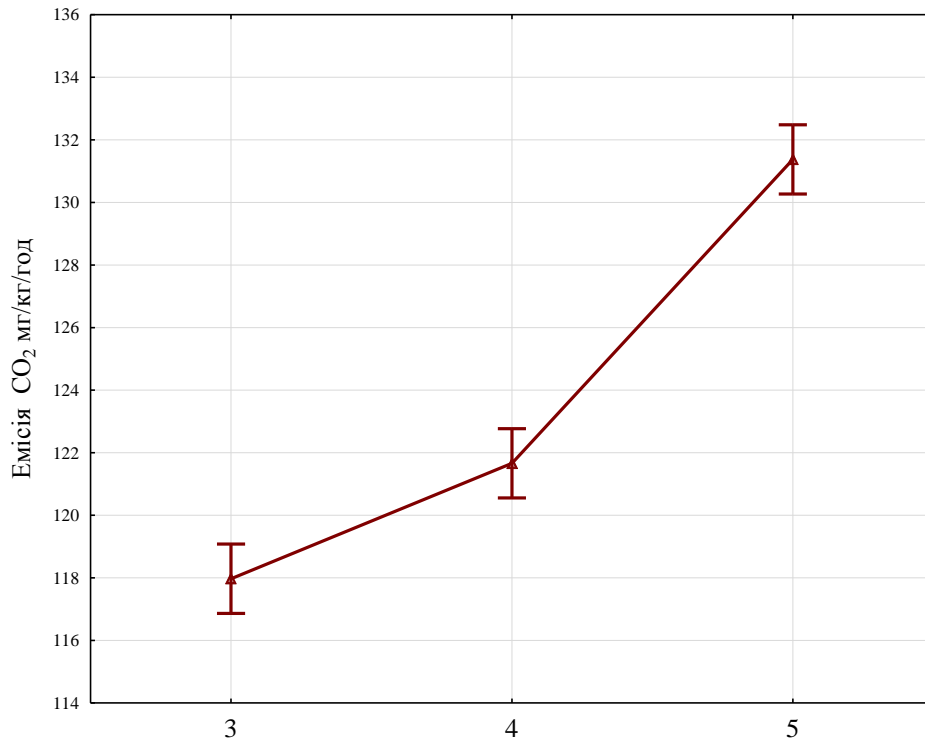


Рис. 4.7. Залежність емісії оксиду вуглецю від вегетаційного року (вертикальні лінії вказують на 95%-й довірчий інтервал). Ось абсцис – роки вегетації



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 (рис. 4.8).

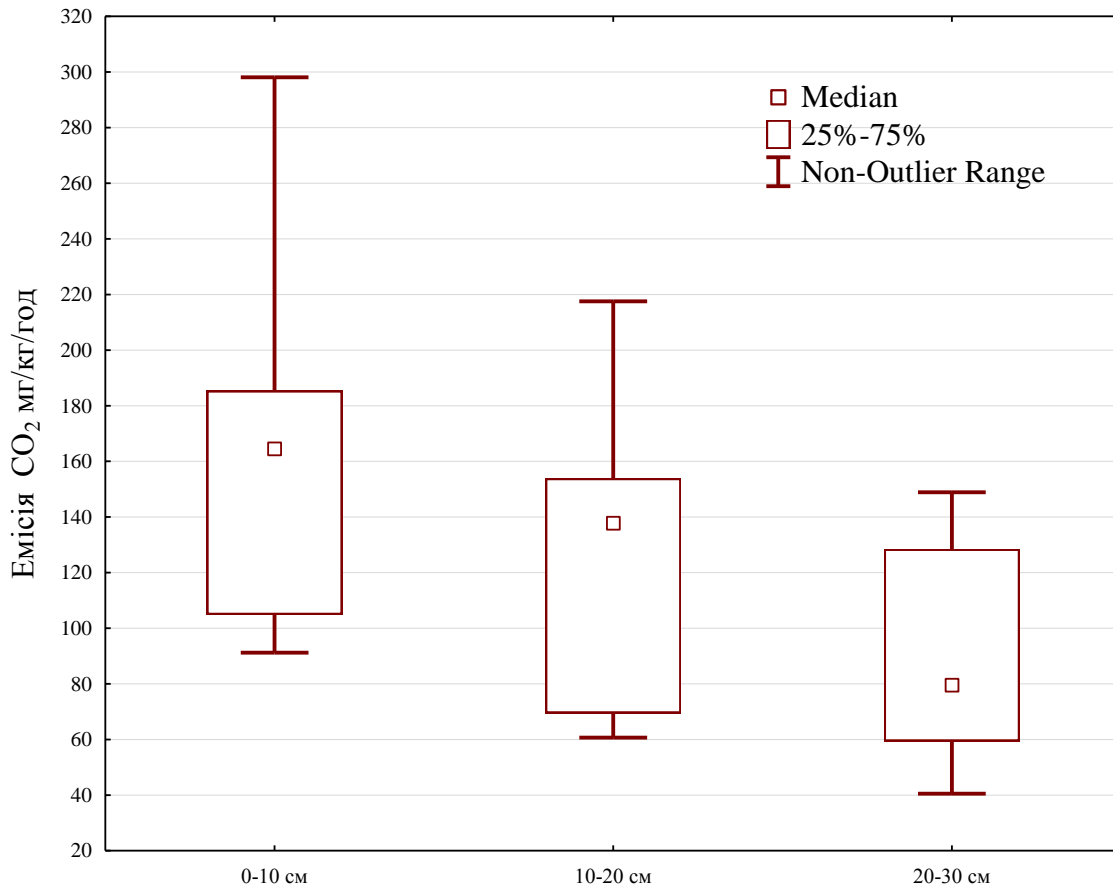


Рис. 4.8. Залежність емісії оксиду вуглецю від ґрунтового шару. Ось абсцис – шари ґрунту

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.

### 3.3. Оцінка взаємодії факторів у впливі на емісію оксиду вуглецю

Взаємодії року та вегетаційного року пояснюють 1.4 % варіації інтенсивності емісії оксиду вуглецю. Найбільш суттєві відмінності між вегетаційними роками було встановлене у 2018 році (рис. 4.9).

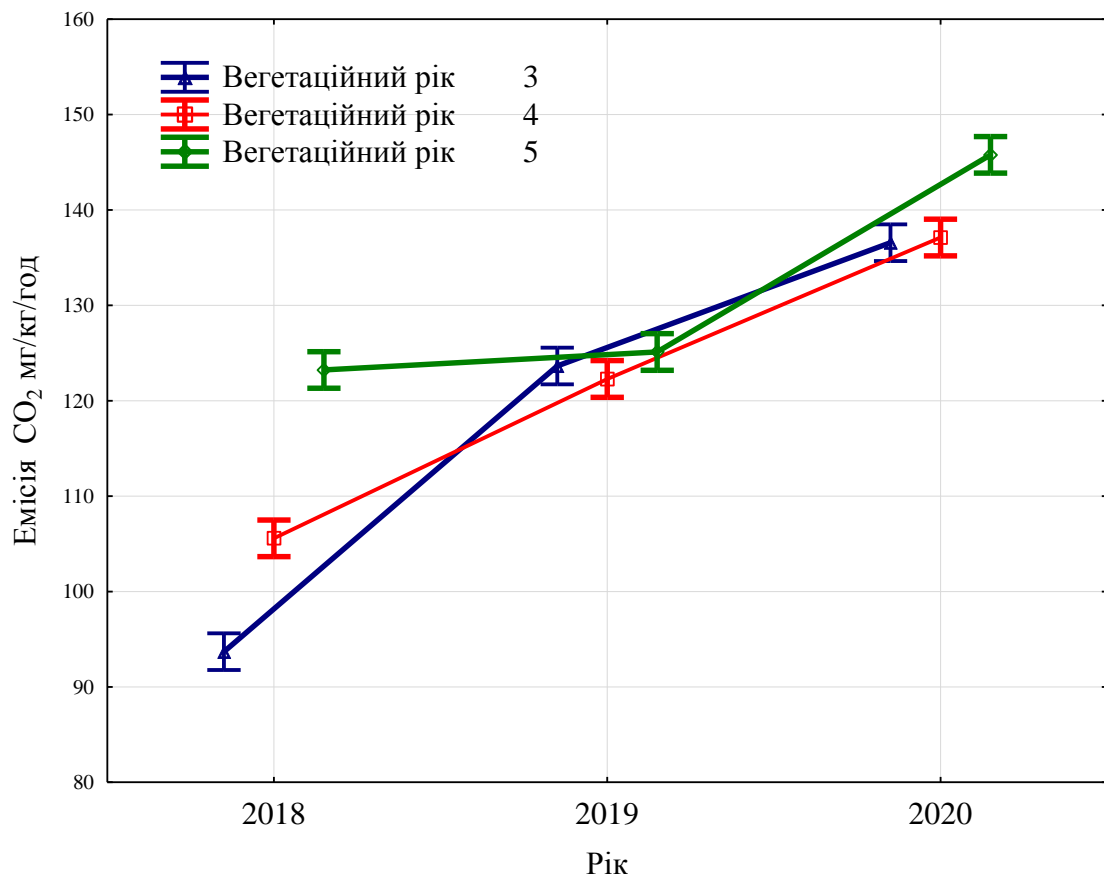


Рис. 4.9. Залежність емісії оксиду вуглецю від взаємодії року та вегетаційного року (вертикальні лінії вказують на 95%-й довірчий інтервал). Ось абсцис – роки

У 2018 році відмінності між роками вегетації були статистично вірогідними ( $F = 36191.6, p < 0.001$ ). Найменша інтенсивність була встановлена для 3-го року вегетації, більша інтенсивність була для 4-го року, та найбільша – для 5-го року. В 2019 році відмінності були статистично не вірогідними. В 2020 році вірогідно більшим був показник емісії для 5-го року вегетації, тоді як 3-й та 4-й роки між собою статистично вірогідно не розрізнялися.

Диференціальна чутливість культур до фактору часу здатна пояснити 5.2 % варіації інтенсивності емісії оксиду вуглецю. Емісія оксиду вуглецю за умов контролю практично не змінюється протягом трьох років дослідження ( $F = 1.96, p = 0.16$ ) (рис. 4.10).

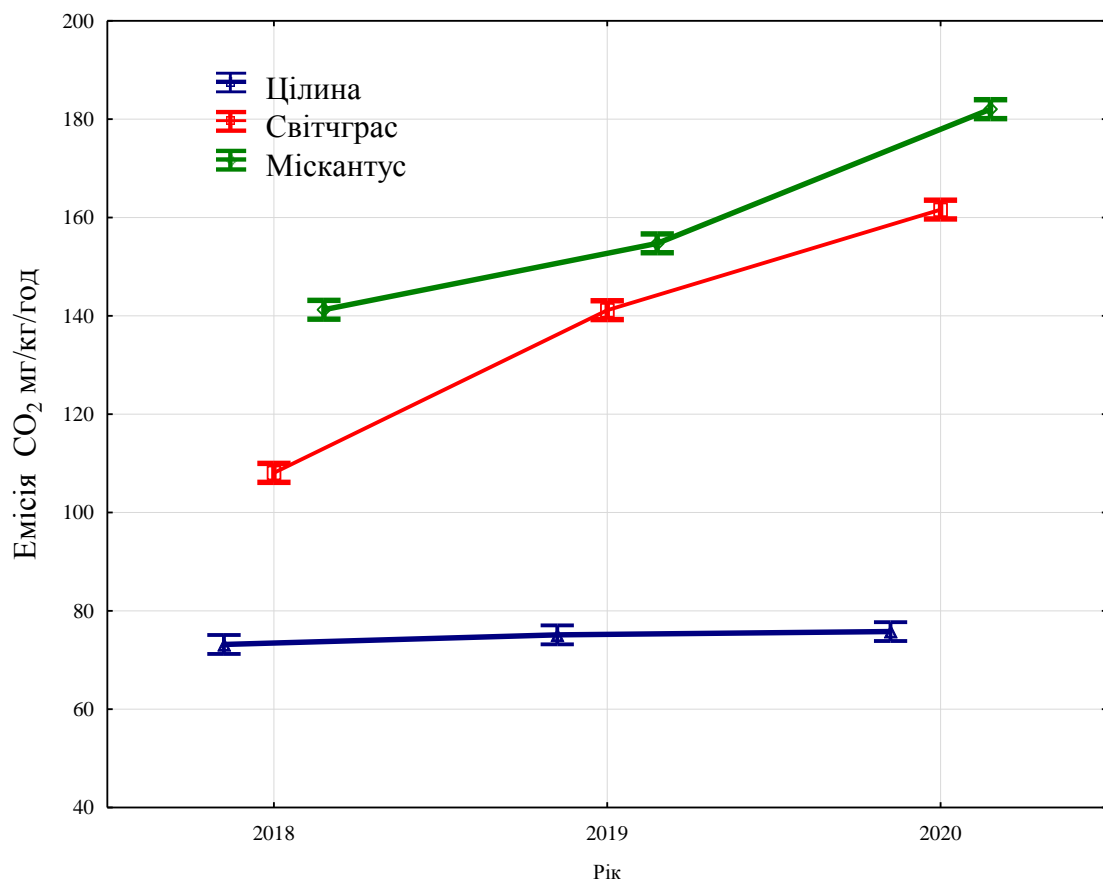


Рис. 4.10. Залежність емісії оксиду вуглецю від взаємодії року та типу культури (вертикальні лінії вказують на 95%-й довірчий інтервал). Ось абсцис – роки

Реагування емісії оксиду вуглецю з ґрунту як під світчграсом, так і під міскантусом, є однотипним на фактор року.

Диференціальна чутливість культур до вегетаційного року здатна пояснити 2.3 % варіації інтенсивності емісії оксиду вуглецю. Зі збільшенням вегетаційного року спостерігається тенденція до уповільнення інтенсивності емісії в контрольних умовах (рис. 4.11). Інтенсивність емісії під свідчграсом зростає практично лінійно зі збільшенням термінів вегетації, тоді як для міскантуса цей показник постійно зростає з часом вегетації.

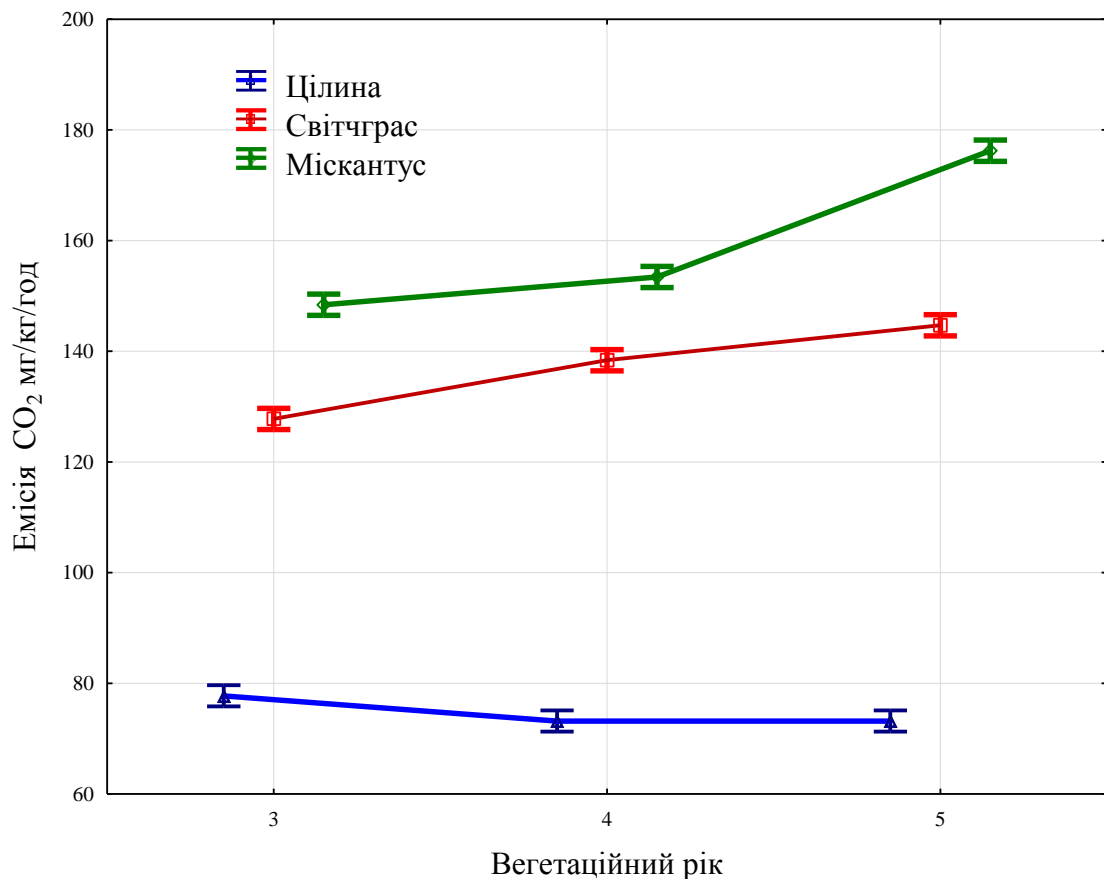


Рис. 4.11. Залежність емісії оксиду вуглецю від взаємодії року вегетації та типу культури (вертикальні лінії вказують на 95%-й довірчий інтервал). Ось абсцис – роки вегетації

Особливості інтенсивності емісії оксиду вуглецю в різні роки з різних шарів ґрунту пояснюють 3.6 % варіації цього показнику. В 2018 році інтенсивність емісії зменшується з глибиною практично лінійно (рис. 4.12). В 2019 році загальний тренд зменшення емісії з глибиною є також практично лінійним, але це зменшення є більш повільним з глибиною. В 2020 році відбувалось різке зменшення інтенсивності емісії на глибині 10–20 см

порівняно з глибиною 0–10 см. Спостережувані патерни профільного розподілу інтенсивності емісії оксиду вуглецю можуть бути пояснені температурним режимом кожного року. В 2018 році середня річна температура повітря була найменшою, відповідно до чого ми спостерігали найменший рівень емісії по усіх горизонтах та лінійний тренд зменшення профілем ґрунту з глибиною. У 2019 році середня річна температура була вищою і в усіх частинах профілю інтенсивність емісії стала більшою, при чому лінійний патрен профільного розподілу не змінився.

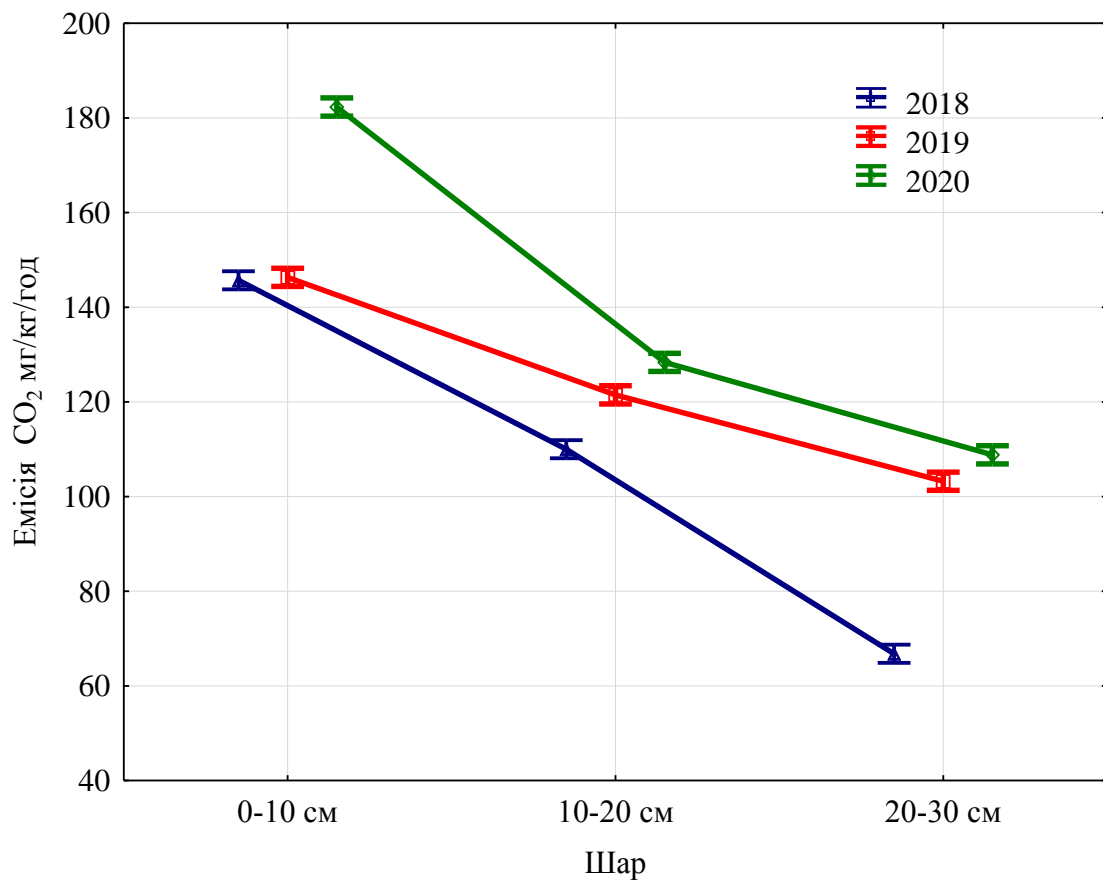


Рис. 4.12. Залежність емісії оксиду вуглецю від взаємодії року та шару ґрунту (вертикальні лінії вказують на 95%-й довірчий інтервал). Ось абсцис – шари ґрунту

У 2020 році середня річна температура була найбільшою. Загальна інтенсивність емісії зросла, але це збільшення було найсуттєвішим саме у верхньому шарі ґрунту. Таким чином, зміни забезпечення теплом впливають

як на загальну інтенсивність емісії оксиду вуглецю, так і на профільний розподіл цього показника.

Профільний розподіл інтенсивності емісії оксиду вуглецю залежно від вегетаційного року здатний пояснити 4.1 % варіації цього показника. Загальний патерн профільного розподілу є типовим для усіх вегетаційних періодів, що проявляє себе у зменшенні емісії з глибиною (рис. 4.13). Інтенсивність емісії більша на 5-й рік, дещо менша – на 4-й рік та найменша на 3-й рік вегетації.

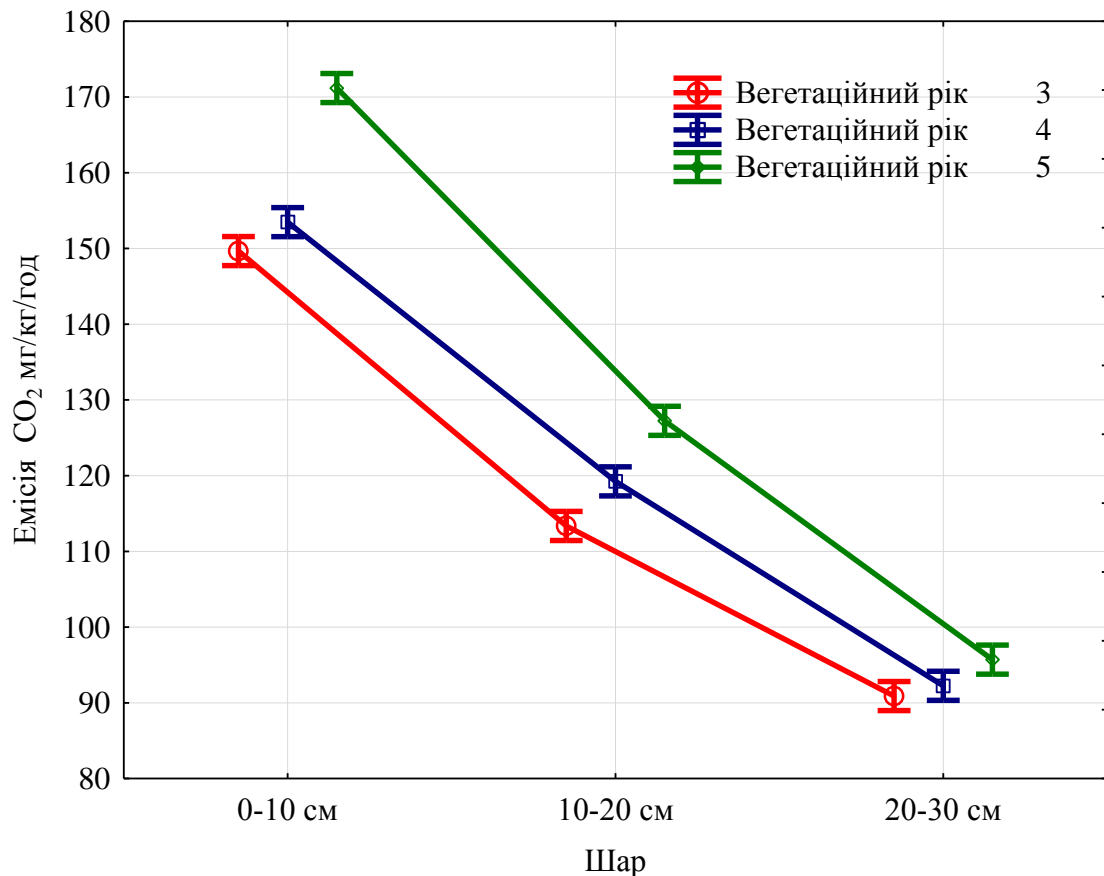


Рис. 4.13. Залежність емісії оксиду вуглецю від взаємодії вегетаційного року та шару ґрунту (вертикальні лінії вказують на 95%-й довірчий інтервал). Ось абсцис – шари ґрунту

Найбільші відмінності між вегетаційними роками за показниками емісії спостерігаються в верхніх шарах ґрунту і зі збільшенням глибини ці відмінності зменшуються. Очевидно, що більше надходження органічної речовини у верхніх шарах з плином часу вегетації може пояснити

спостережувані закономірності. Агрегатоутворення кореневими системами рослин також зростає з плином часу вегетації рослинних угруповань, що також сприяє оптимізації повітряного режиму ґрунтів.

Особливості профільного розподілу емісії оксиду вуглецю залежно від типу культури, яка вирощується, здатні пояснити 4.1 % варіації цього показнику. Для цілини характерним є досить різкий перетин профільного розподілу на межі шарів ґрунту 0–10 та 10–20 см (рис. 4.14). Для світчґрасу та міскантусу спостерігається практичне лінійне зменшення інтенсивності емісії з глибиною.

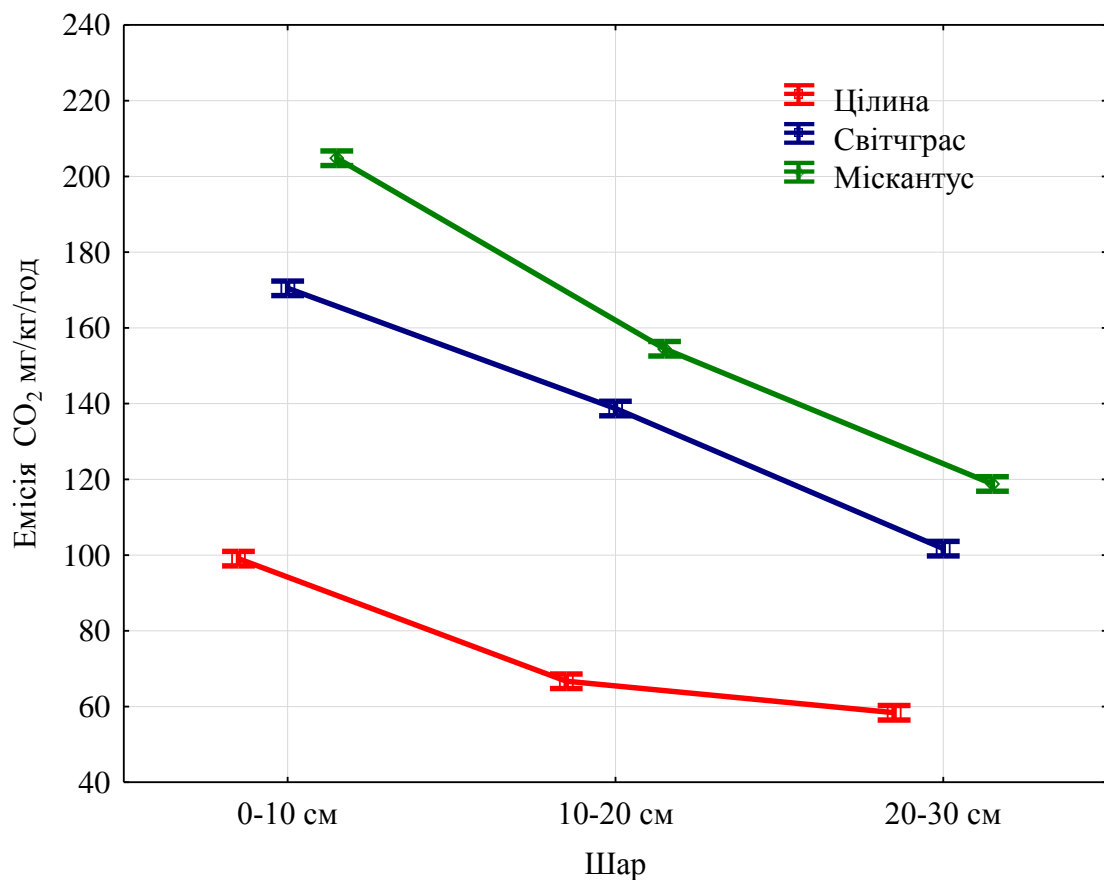


Рис. 4.14. Залежність емісії оксиду вуглецю від взаємодії типу культури та шару ґрунту (вертикальні лінії вказують на 95%-й довірчий інтервал). Ось абсцис – шари ґрунту

Такі особливості можна пояснити профільним розподілом кореневої системи рослин та їх впливу на ґрунт. Енергетичні культури формують масивну мочкувату кореневу систему, яка значно насичує органічною

речовиною потужні ґрунтові шари на значну глибину. Також мочкувата коренева система сприяє формуванню водостійкої агрегатної структури ґрунту, яка є умовою оптимізації повітряного та водного режиму ґрунту. Наявність повітря та необхідної кількості води є обов'язковою вимогою нормального функціонування ґрунтової біоти, результатом чого є активізація як процесів мінералізації, так і гуміфікації органічної речовини в ґрунті.

### Висновки за розділом

1. Культура, глибина шару ґрунту, рік та вік вегетації визначають 95 % варіювання емісії оксиду вуглецю ґрунтом. Культура є статистично вірогідним предиктором швидкості емісії оксиду вуглецю та здатна пояснити 49.0 % варіювання цього показника. Ґрунт під сінажаттю характеризується найменшим рівнем емісії оксиду вуглецю (у середньому становить  $74.70 \pm 0.90$  мг/кг/год). Під світчграсом емісія оксиду вуглецю зростає на 83.3 % порівняно з контролем, а під міскантусом зростає на 113.3 % порівняно з контролем.
2. Міжрічне варіювання інтенсивності емісії оксиду вуглецю пояснює 3.8 % мінливості цього показника та може бути пояснене 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 міскантусу, дещо менш чутливою є емісія з насаджень світчграсу. Цілинний покрив є найбільш резистентним до варіювання кліматичних умов.
3. Емісія зростає з віком вегетаційного покриву, що може бути пояснене накопиченням біомаси в ґрунті більш старих за віком плантацій. Відмінності між віком вегетаційного покриву зменшуються при зростанні середньорічної температури. Емісія з цілинного покриву майже не залежить від його віку в дослідженому діапазоні. Найбільше з віком зростає емісія оксиду вуглецю під насадженнями міскантусу.



4. Глибина шару ґрунту здатна пояснити 26.7 % варіювання інтенсивності емісії оксиду вуглецю. 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 міскантусу, а найменш вираженими для цілинної рослинності.

## РОЗДІЛ 5

### ДЕПОНУВАННЯ КАРБОНУ ПІД ЧАС ВИРОЩУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР

#### 5.1. Описові статистики депонування карбону

Депонування карбону в ґрунті, під час проведення досліджень коливалось в дуже широких межах (табл. 4.1). В цілних умовах (контроль) депонування карбону в ґрунті варіює у межах від 0.92 до 2.66 % (рис. 5.1). Діапазон варіювання цього показнику становить 1.74 %.

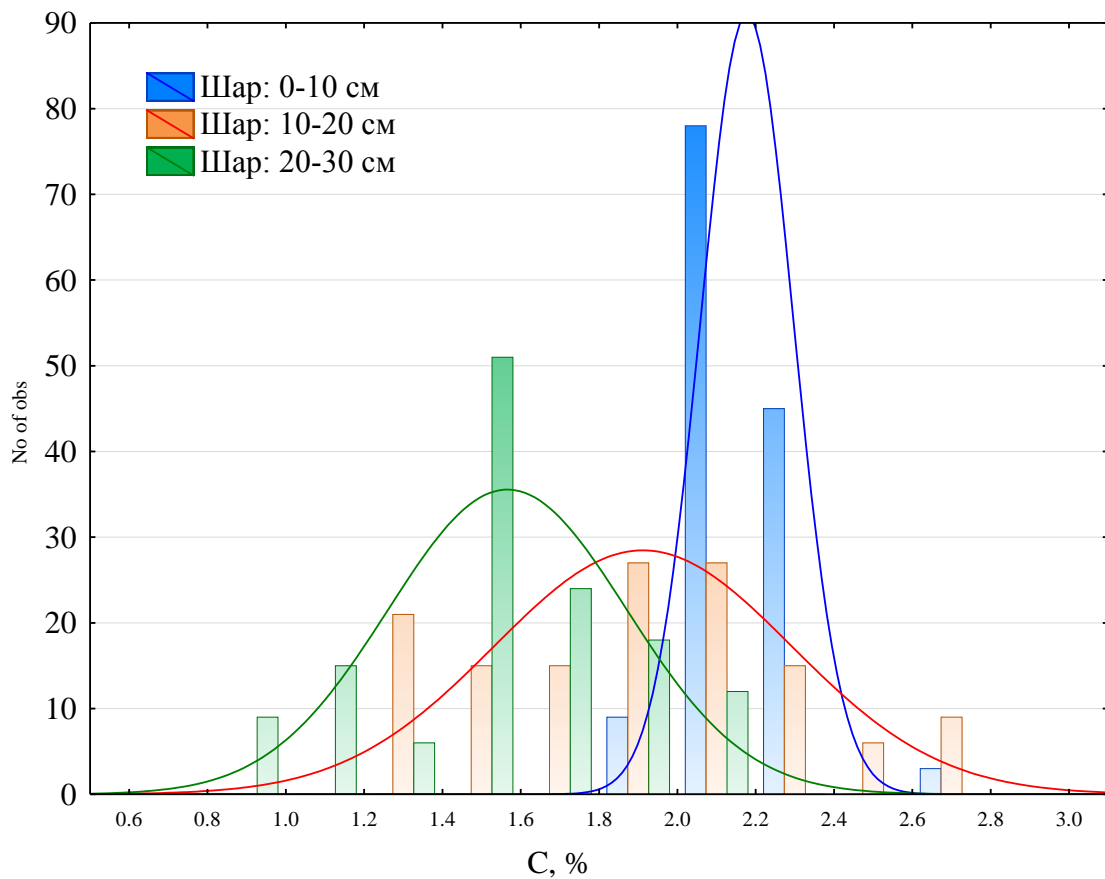


Рис. 5.1. Статистичний розподіл депонування карбону у контрольних умовах (цілина). Ось абсцис – вміст C, %; ось ординат – кількість спостережень

Рис. 5.1. Депонування карбону в ґрунті (% C) для культур різного року вегетації на різних глибинах ґрунту (N = 15)

Веgetаційний рік	Варіант	Шар	2018			2019			2020		
			Середня± ст.помилка	Мінімум	Максимум	Середня± ст.помилка	Мінімум	Максимум	Середня± ст.помилка	Мінімум	Максимум
3	Цілина	0-10 см	2.16±0.029	1.94	2.36	2.16±0.045	1.93	2.66	2.19±0.011	2.11	2.26
		10-20 см	1.89±0.090	1.36	2.23	1.91±0.079	1.39	2.47	1.92±0.127	1.28	2.64
		20-30 см	1.54±0.021	1.39	1.68	1.54±0.104	0.92	1.91	1.60±0.090	1.11	2.17
	Світчграс	0-10 см	2.23±0.043	1.96	2.48	2.23±0.116	1.77	2.90	2.37±0.085	1.62	2.96
		10-20 см	1.98±0.068	1.56	2.24	1.98±0.055	1.68	2.20	2.35±0.146	1.03	2.98
		20-30 см	1.59±0.080	1.28	2.06	1.61±0.036	1.38	1.74	1.69±0.072	1.11	2.11
	Міскантус	0-10 см	2.27±0.081	1.82	2.78	2.40±0.085	1.98	2.92	2.43±0.055	2.13	2.75
		10-20 см	2.14±0.095	1.73	2.68	2.16±0.072	1.19	2.37	2.29±0.073	1.83	2.57
		20-30 см	1.55±0.016	1.41	1.66	1.68±0.098	1.08	2.11	1.71±0.055	1.38	1.96
4	Цілина	0-10 см	2.16±0.029	1.94	2.36	2.16±0.045	1.93	2.66	2.19±0.011	2.11	2.26
		10-20 см	1.89±0.090	1.36	2.23	1.91±0.079	1.39	2.47	1.92±0.127	1.28	2.64
		20-30 см	1.54±0.021	1.39	1.68	1.54±0.104	0.92	1.91	1.60±0.090	1.11	2.17
	Світчграс	0-10 см	2.24±0.048	1.92	2.44	2.26±0.067	1.83	2.52	2.43±0.077	2.17	2.86
		10-20 см	2.01±0.208	1.27	3.16	2.01±0.208	1.27	3.16	2.40±0.085	1.98	2.92
		20-30 см	1.62±0.062	1.33	2.01	1.61±0.036	1.38	1.74	1.57±0.134	1.15	2.38
	Міскантус	0-10 см	2.30±0.047	2.05	2.61	2.41±0.144	1.95	3.23	2.41±0.112	2.01	3.06
		10-20 см	2.22±0.138	1.47	2.79	2.30±0.054	2.02	2.71	2.49±0.143	1.83	3.52
		20-30 см	1.64±0.058	1.33	2.01	1.68±0.096	1.11	2.09	1.93±0.016	1.83	2.04
5	Цілина	0-10 см	2.16±0.029	1.94	2.36	2.16±0.045	1.93	2.66	2.19±0.011	2.11	2.26

Вегетаційний рік	Варіант	Шар	2018			2019			2020		
			Середня± ст.помилка	Мінімум	Максимум	Середня± ст.помилка	Мінімум	Максимум	Середня± ст.помилка	Мінімум	Максимум
		10-20 см	1.89±0.090	1.36	2.23	1.91±0.079	1.39	2.47	1.92±0.127	1.28	2.64
		20-30 см	1.54±0.021	1.39	1.68	1.54±0.104	0.92	1.91	1.60±0.090	1.11	2.17
	Світчграс	0-10 см	2.28±0.023	2.13	2.41	2.31±0.088	1.78	2.67	2.46±0.027	2.35	2.64
		10-20 см	2.12±0.107	1.59	2.64	2.18±0.030	2.02	2.35	2.41±0.144	1.95	3.23
		20-30 см	1.66±0.053	1.36	1.89	1.62±0.033	1.45	1.85	1.60±0.047	1.34	1.84
	Міскантус	0-10 см	2.34±0.057	1.67	2.61	2.42±0.162	1.68	3.27	2.80±0.156	1.93	3.41
		10-20 см	2.24±0.026	2.03	2.39	2.59±0.083	2.05	2.98	2.16±0.116	1.65	2.94
		20-30 см	1.65±0.026	1.51	1.82	1.78±0.037	1.48	1.97	1.97±0.105	1.52	2.58

Найбільший рівень депонування карбону під ціліною 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 світчґрасу депонування карбону в ґрунті варіює у межах від 1.03 до 3.23 % (рис. 5.2). Діапазон варіювання цього показнику становить 2.20 %.

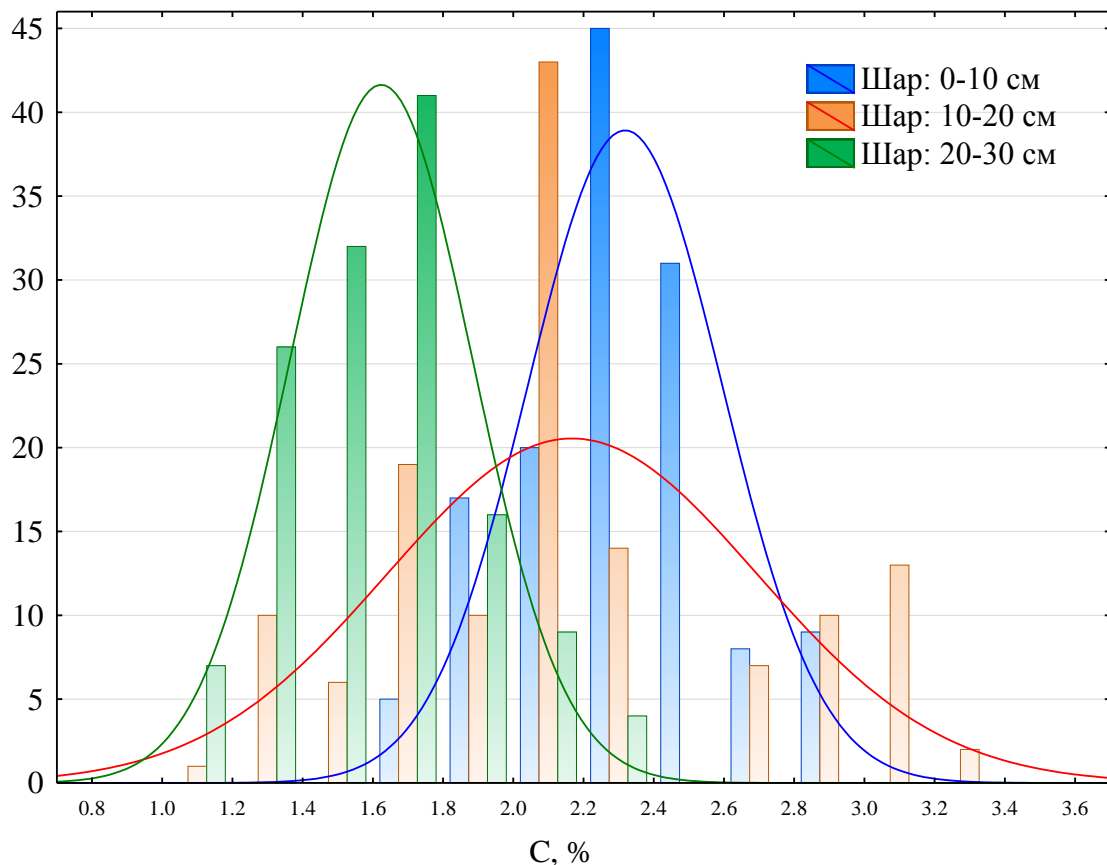


Рис. 5.2. Статистичний розподіл депонування карбону під насадженням світчґрасу. Ось абсцис – вміст С, %; ось ординат – кількість спостережень

Найбільший рівень депонування карбону під насадженням світчґрасу 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 % (рис. 5.3). Діапазон варіювання цього показнику становить 2.44 %.

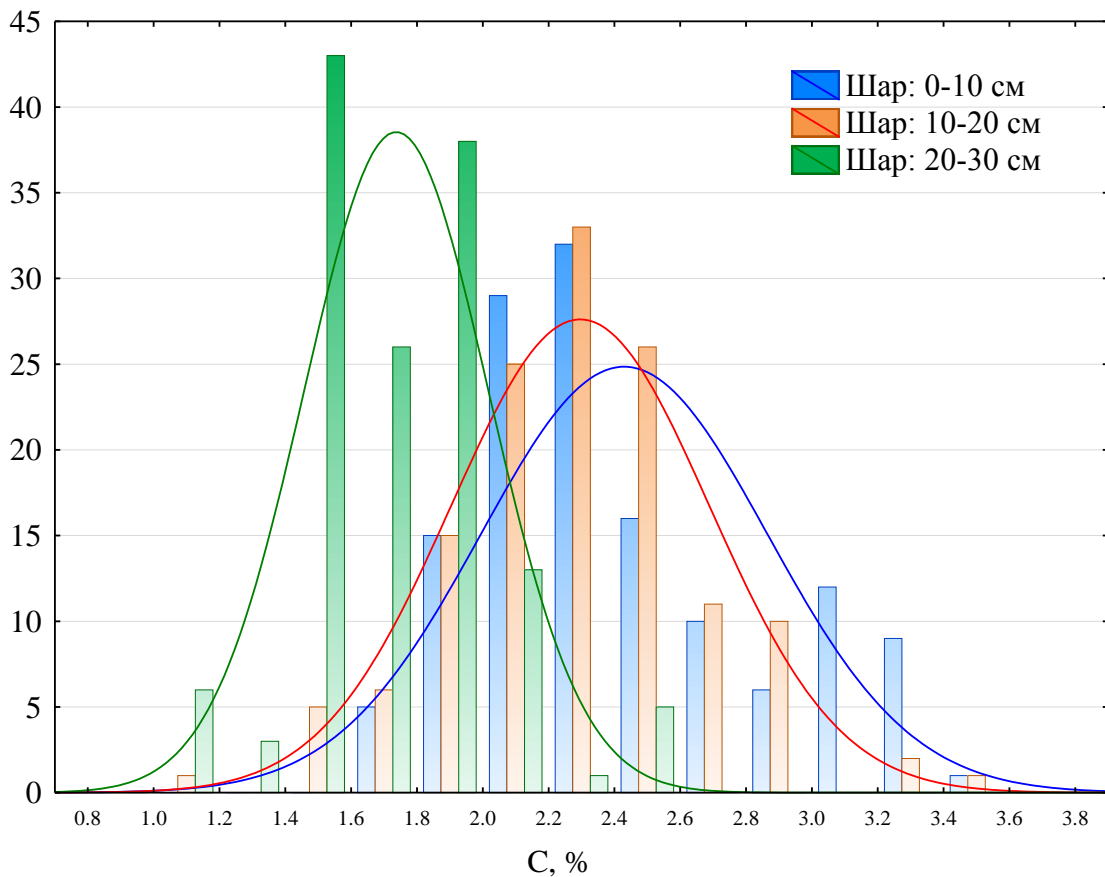


Рис. 5.3. Статистичний розподіл депонування карбону під насадженням міскантусу. Ось абсцис – вміст С, %; ось ординат – кількість спостережень

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 %.

## 5.2. Порівняльний аналіз внеску різних факторів у варіювання депонування карбону в ґрунті

Культура, глибина шару ґрунту, рік та рік вегетації визначають 60 % варіювання депонування карбону в ґрунті (табл. 5.2).

Таблиця 5.2. 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	–	–

Культура є статистично вірогідним предиктором швидкості депонування карбону та здатна пояснити 8.5 % варіювання цього показника (рис. 5.4).

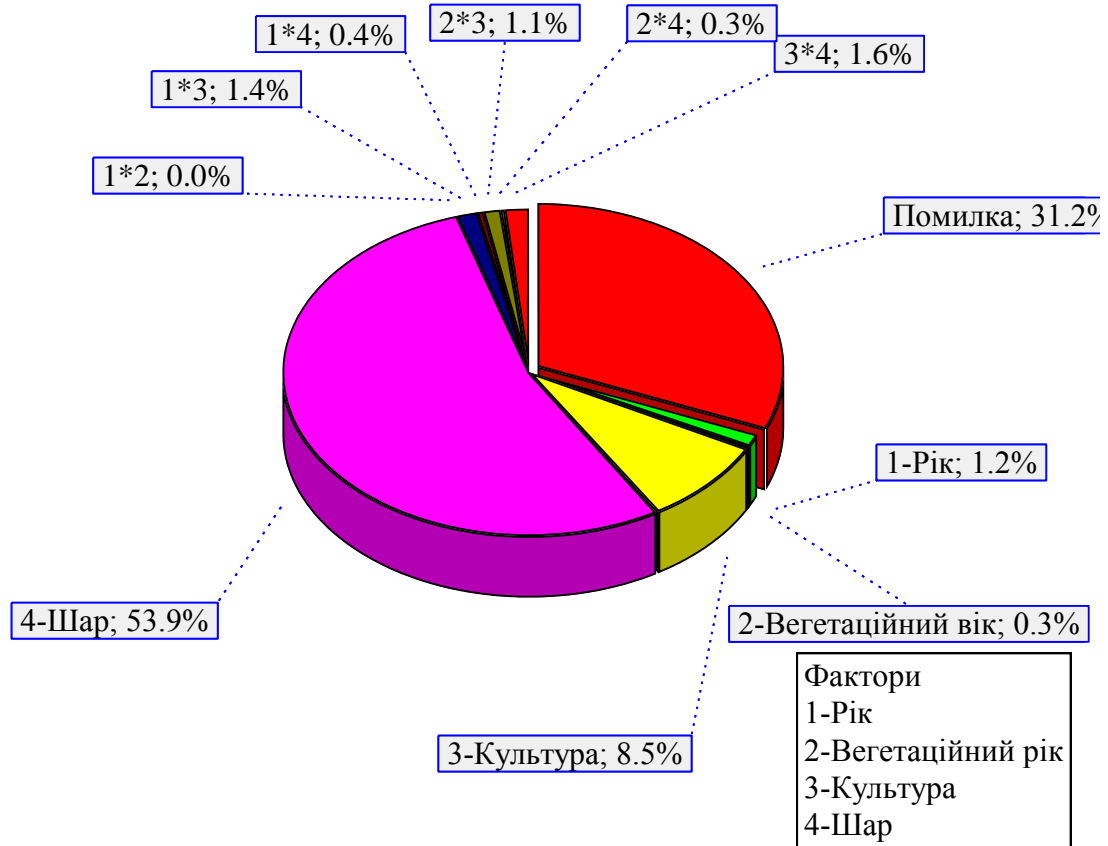


Рис. 5.4. Внесок впливу культури, глибини шару ґрунту, року та року вегетації, а також їх взаємодії, у варіацію депонування карбону ґрунтом

Ґрунт під цілинною рослинністю характеризується найменшим вмістом вуглецю (у середньому становить  $1.87 \pm 0.017$  %) (рис. 5.5). Під світчграсом депонування карбону в ґрунті зростає на 7.1 % (у середньому становить  $2.01 \pm 0.020$  %), що статистично вірогідно відрізняється від контролю ( $F = 57.8$ ,  $p < 0.001$ ). Депонування карбону в ґрунті під міскантусом також перевищує контроль на 15.4 % (у середньому становить  $2.16 \pm 0.021$  %), що статистично вірогідно відрізняється від контролю ( $F = 256.9$ ,  $p < 0.001$ ). Рівень депонування карбону в ґрунті під міскантусом перевищує цей показник під просом на 7.7 %. Ця відмінність є статистично вірогідною ( $F = 74.4$ ,  $p < 0.001$ ).



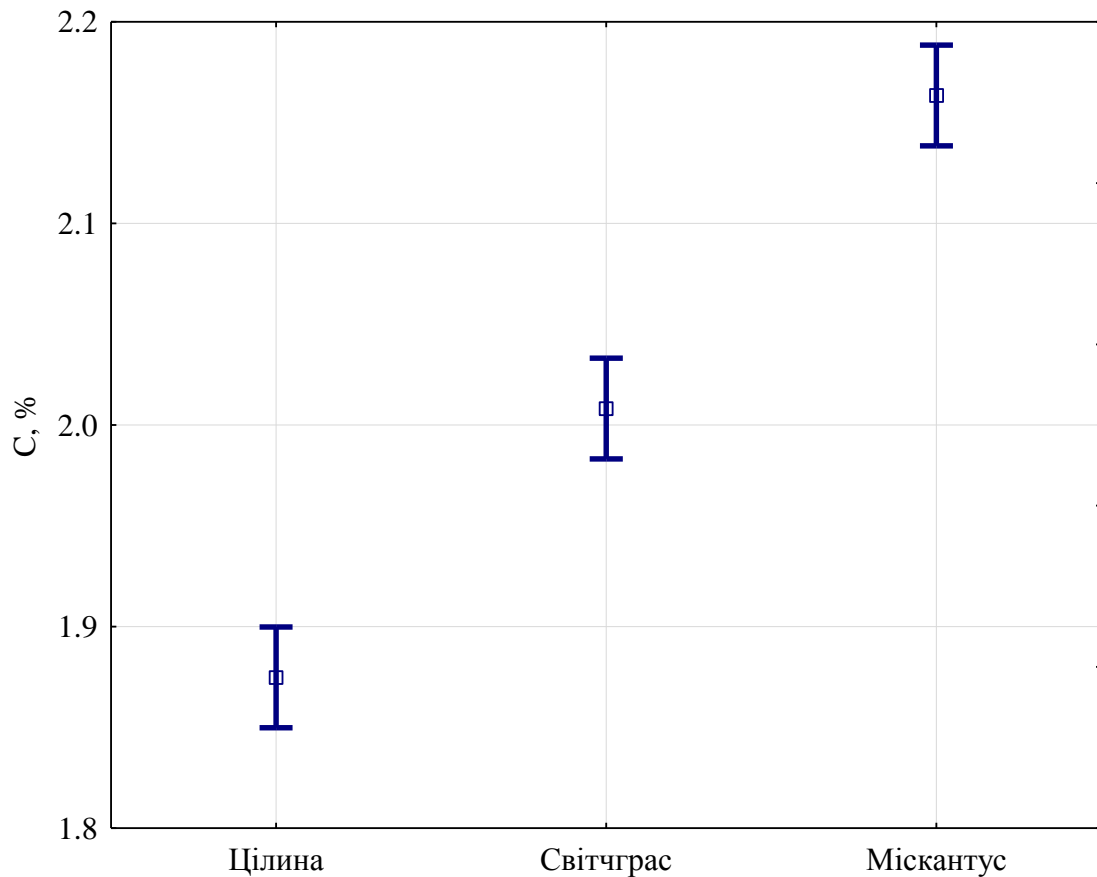


Рис. 5.5. Залежність депонування карбону від культури (вертикальні лінії вказують на 95%-й довірчий інтервал)

Рік також є статистично вірогідним предиктором інтенсивності депонування карбону. Цей показник здатний пояснити 1.2 % варіації депонування карбону. Найменшим середній вміст карбону був у 2018 році, ще більшим він був у 2019 році, та найбільшим був у 2019 році (рис. 5.6). 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 депонування карбону.

Протягом віку вегетації інтенсивність депонування карбону демонструє тенденцію до зростання (рис. 5.7). У третій рік вегетації депонування карбону в ґрунті становить  $1.99 \pm 0.019$  %.

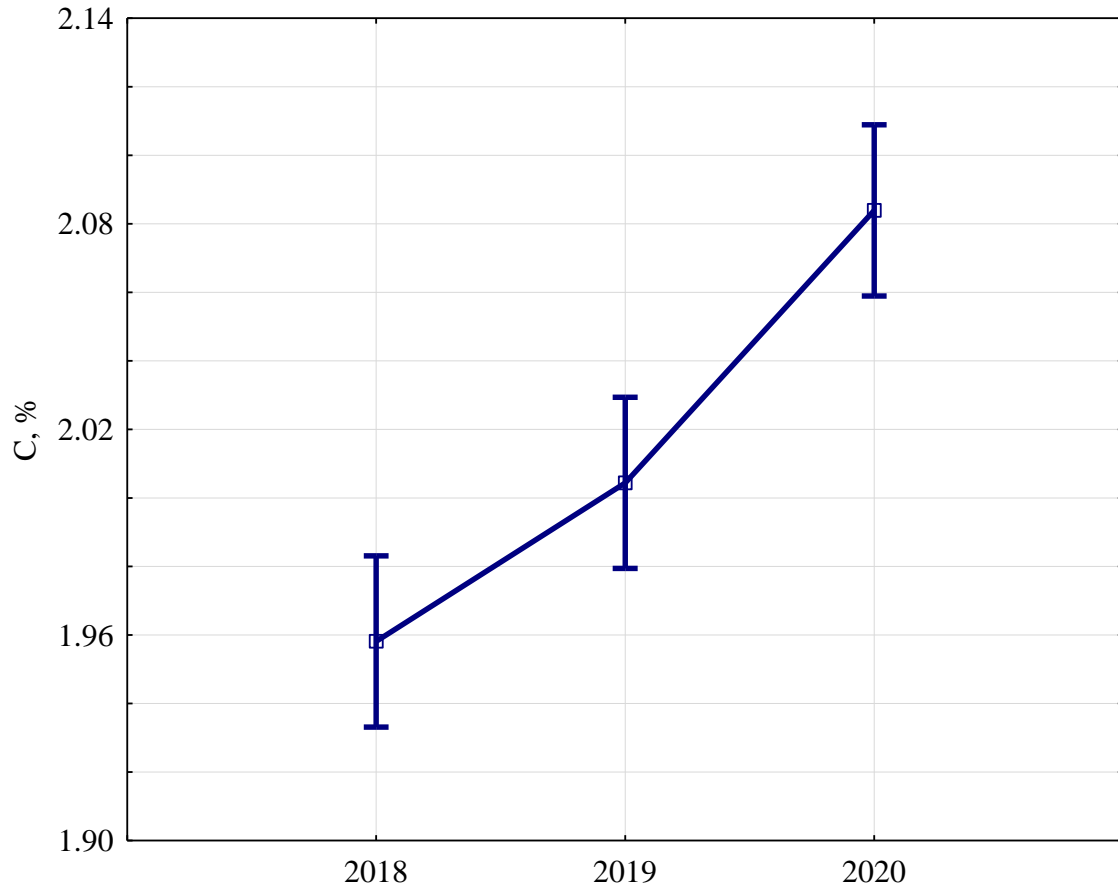


Рис. 5.6. Залежність депонування карбону від року (вертикальні лінії вказують на 95%-й довірчий інтервал)

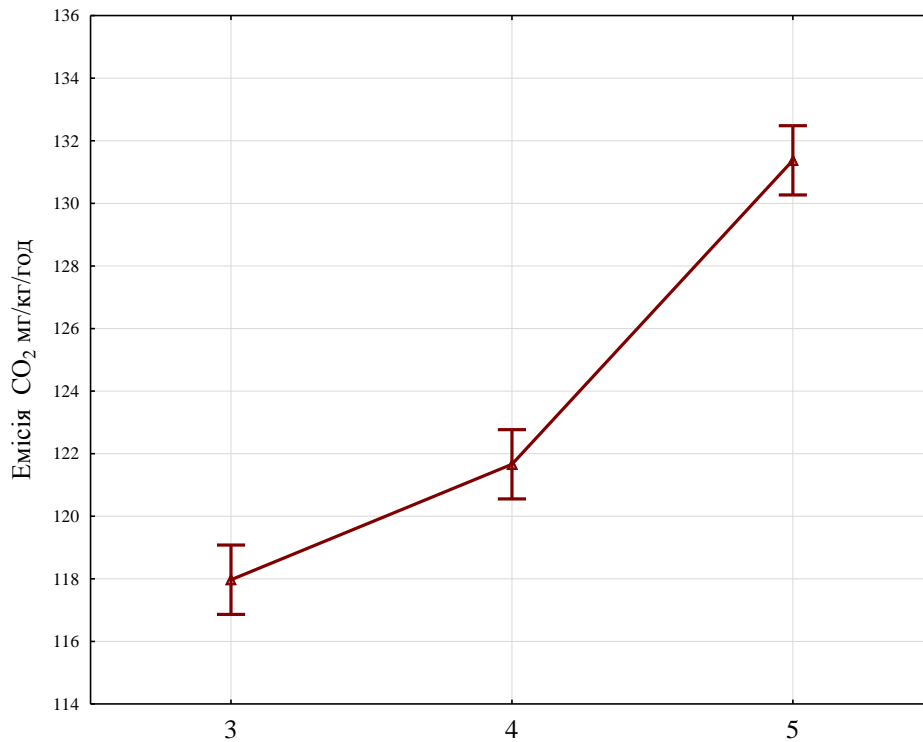


Рис. 4.7. Залежність депонування карбону від вегетаційного року (вертикальні лінії вказують на 95%-й довірчий інтервал). Ось абсцис – роки вегетації

На четвертий рік вегетації цей показник збільшується на 0.5 % до рівня  $2.00 \pm 0.019$  %, що не є статистично вірогідно вище контролю ( $F = 0.26$ ,  $p = 0.60$ ). На п'ятий рік зростання становить 4.0 % порівняно з контролем ( $2.07 \pm 0.022$  %), або 3.5 % порівняно з попереднім роком. Це зростання порівняно з попереднім роком є статистично вірогідним ( $F = 14.9$ ,  $p < 0.001$ ).

Глибина шару ґрунту здатна пояснити 53.9 % варіювання інтенсивності депонування карбону. Зі зростанням глибини інтенсивність депонування карбону знижується (рис. 5.8).

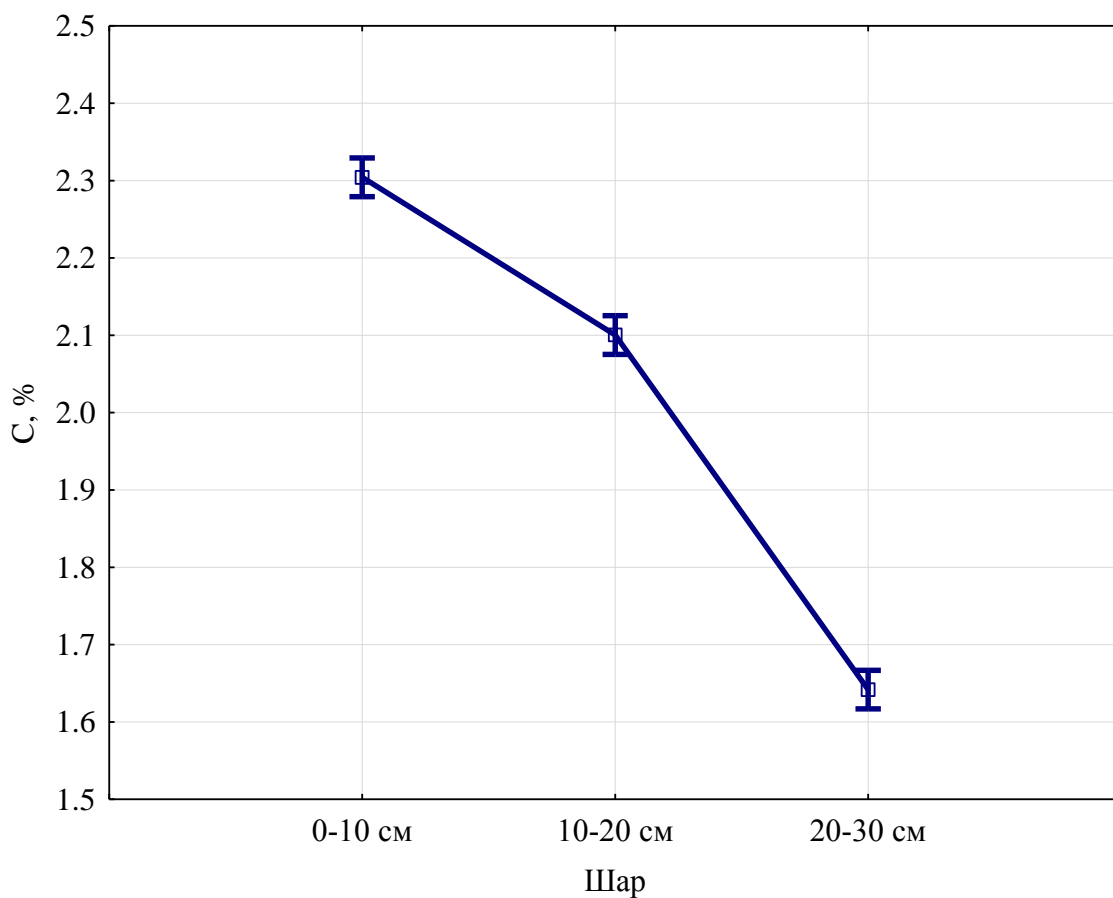


Рис. 5.8. Залежність депонування карбону від ґрунтового шару (вертикальні лінії вказують на 95%-й довірчий інтервал). Ось абсцис – шари ґрунту

У шарі ґрунту 0–10 см інтенсивність депонування карбону становить в середньому  $2.30 \pm 0.014$  %. У шарі 10–20 см цей показник зменшується на 8.8 % та становить  $2.10 \pm 0.017$  %. Це зменшення є статистично вірогідним ( $F = 128.8$ ,  $p < 0.001$ ). У шарі 20–30 см зменшення порівняно з верхнім шаром становить

28.7 %, а з попереднім – 21.8 % ( $1.64 \pm 0.013$  %). Цей показник достовірно вірогідно відрізняється від вмісту вуглецю у більш високому шарі ґрунту ( $F = 648.4$ ,  $p < 0.001$ ). Відмінності в інтенсивності депонування карбону між шарами ґрунту можна пояснити відмінностями у щільності кореневої системи рослин, яка є головним джерелом органічної речовини на різні глибинах. Біологічні особливості корневих систем різних видів рослин та ґрунтові особливості впливають на проникнення органічної речовини на різні глибини. Важливими факторами розвитку корневих систем рослин є забезпечення їх водним та повітряними ресурсами, що у кінцевому рахунку визначається агрегатною структурою ґрунту. Слід відзначити, що такий вплив є взаємним, так як коренева система рослин також є суттєвим чинником, який впливає на агрегатну структуру ґрунту.

### 3.3. Оцінка взаємодії факторів у впливі на емісію оксиду вуглецю

Взаємодія року та вегетаційного віку не є статистично вірогідними для пояснення варіації депонування вуглецю в ґрунті. Це вказує на те, що патерни зміни вмісту вуглецю в ґрунті, які пов'язані з астрономічним роком, не залежать від вегетаційного віку (рис. 5.9). Для кожного вегетаційного віку плантації відмічалась тенденція до збільшення показників вмісту вуглецю в ґрунтах в ряду 2018→2019→2020. Певна тенденція переважання вмісту вуглецю в плантація більшого віку, а саме у 5-ти річних угрупованнях, не є статистично вірогідними. Очевидно, для встановлення статистичної вірогідності відповідних трендів необхідними є подальші дослідження у більш тривалому часі, так як тенденції змін вмісту органічного вуглецю в ґрунті є досить консервативними і їх не завжди можливо встановити за порівняно обмежені вірізки часу. Хоч такі тенденції і не є формально статистично вірогідними, їх не можна виключати як важливі закономірності, які можна підтвердити на основі додаткового експериментального матеріалу.

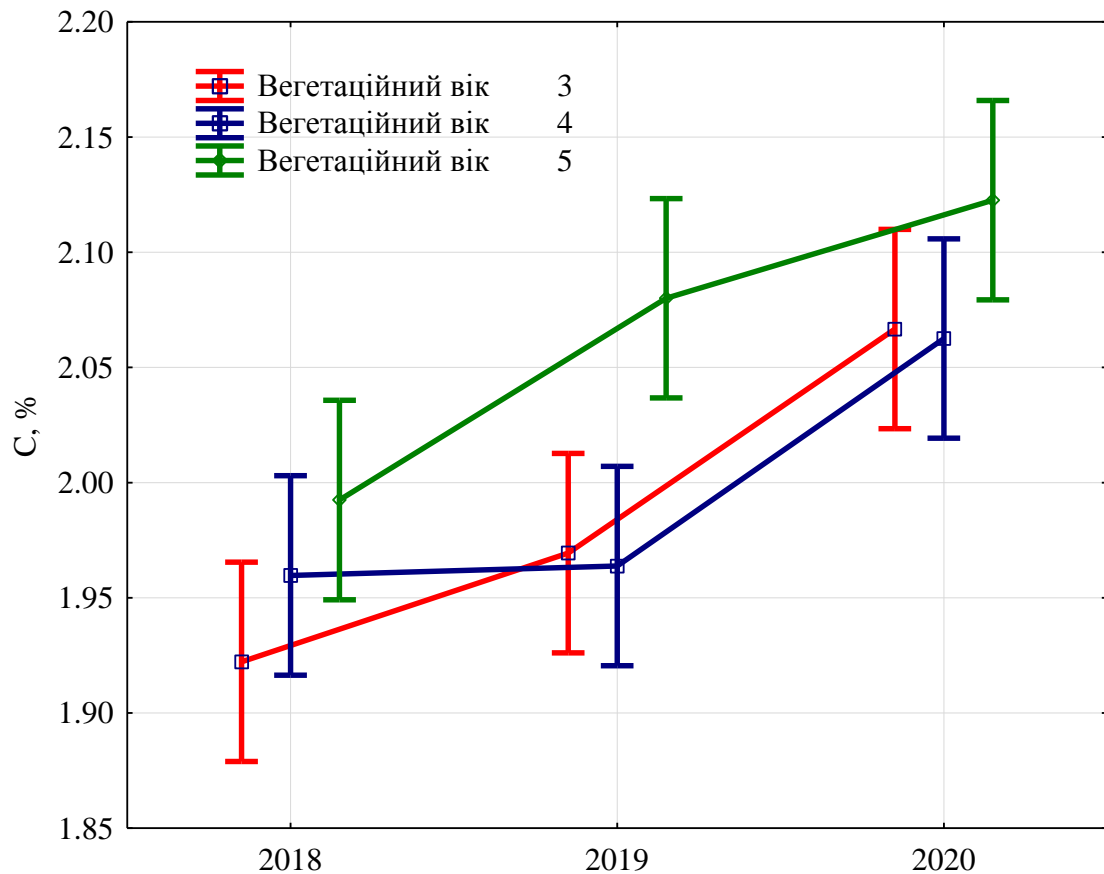


Рис. 5.9. Залежність депонування карбону від взаємодії року та вегетаційного року (вертикальні лінії вказують на 95%-й довірчий інтервал). Ось абсцис – роки

У 2018 році відмінності між роками вегетації не були статистично вірогідними ( $F = 1.44$ ,  $p = 0.22$ ). Найменша інтенсивність була встановлена для 3-го року вегетації, більша інтенсивність була для 4-го року, та найбільша – для 5-го року. В 2019 році відмінності були статистично вірогідними між 3-м та 4-м роками з одного боку та 5-м – з іншого ( $F = 17.7$ ,  $p < 0.001$ ). В 2020 році вірогідно більшим був показник емісії для 5-го року вегетації, тоді як 3-й та 4-й роки між собою статистично вірогідно не розрізнялися.

Диференціальна чутливість вмісту органічного вуглецю під різними культурами до фактору часу здатна пояснити 1.4 % варіації інтенсивності депонування карбону. Вміст органічного вуглецю під ціліною практично не змінюється протягом трьох років дослідження ( $F = 0.33$ ,  $p = 0.56$ ) (рис. 5.10).

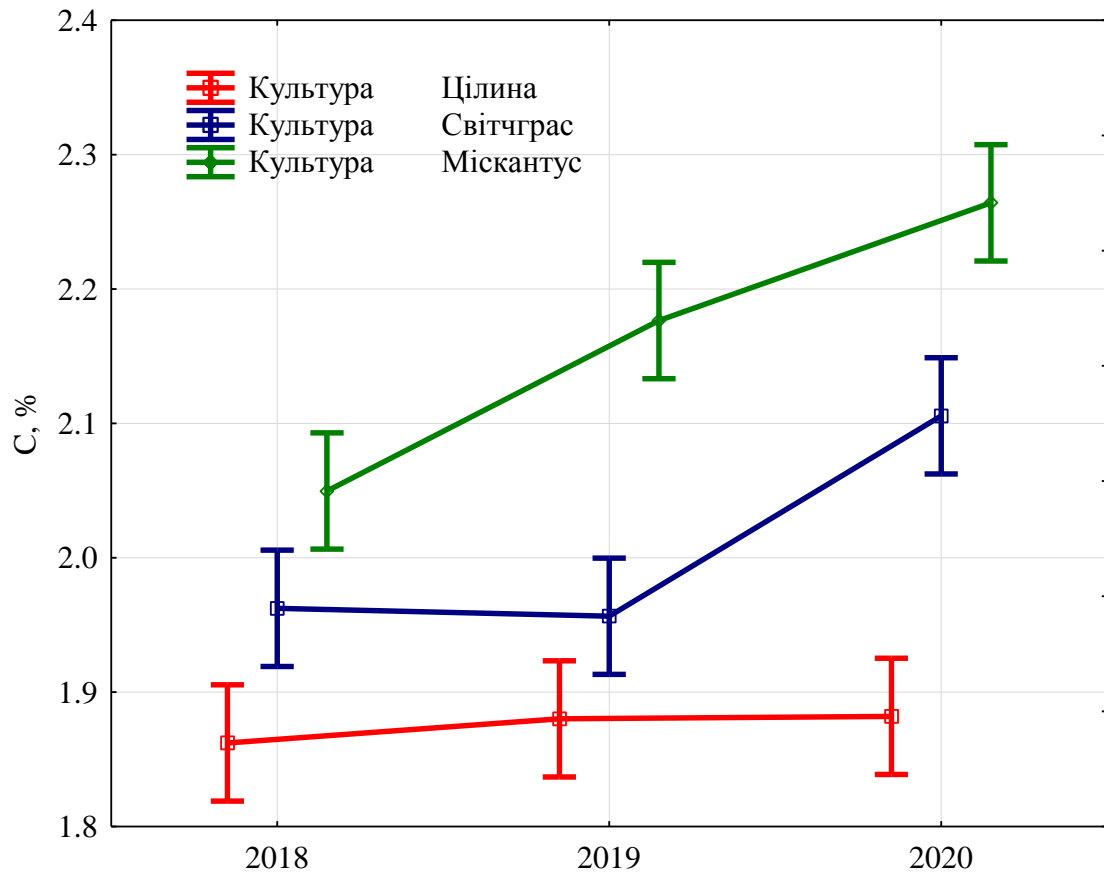


Рис. 5.10. Залежність депонування карбону від взаємодії року та типу культури (вертикальні лінії вказують на 95%-й довірчий інтервал). Ось абсцис – роки

Відмінності у вмісті органічного карбону між 2018 та 2019 не є статистично вірогідними ( $F = 0.04$ ,  $p = 0.85$ ). Збільшення цього показнику в 2020 році є статистично вірогідним ( $F = 22648.2$ ,  $p < 0.001$ ). Для міскантусу спостерігалось збільшення вмісту органічного вуглецю в ґрунті протягом усього періоду дослідження.

Диференціальна чутливість культур до вегетаційного віку здатна пояснити 1.13 % варіації інтенсивності депонування карбону. Для контрольних умов та світчґрасу змін у вмісті органічного вуглецю в ґрунті залежно від віку вегетації не встановлено (рис. 5.11). Вміст вуглецю в ґрунті зростає разом з віком вегетації плантацій міскантусу.

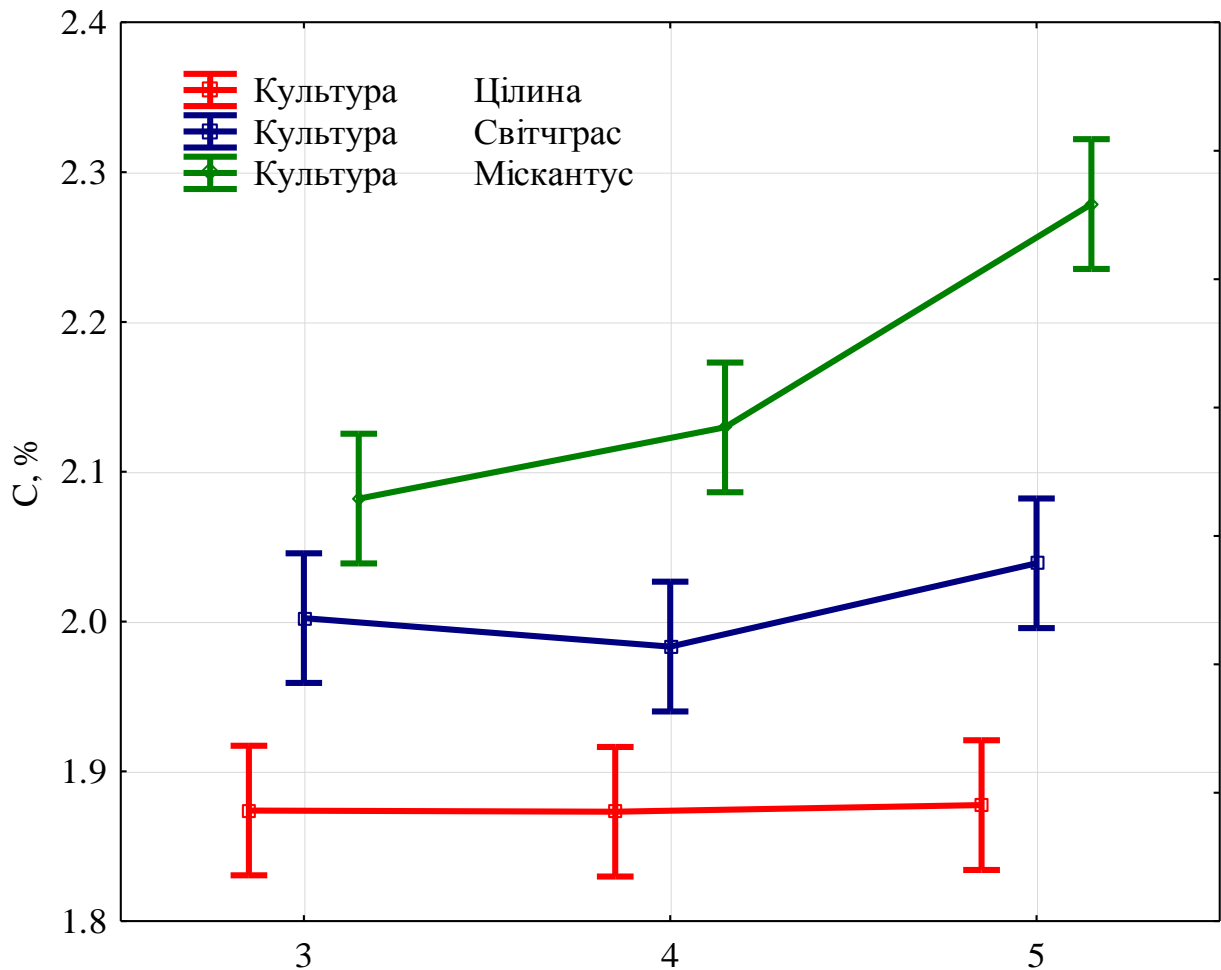


Рис. 5.11. Залежність депонування карбону від взаємодії року вегетації та типу культури (вертикальні лінії вказують на 95%-й довірчий інтервал). Ось абсцис – роки вегетації

Особливості інтенсивності депонування карбону в різні роки з різних шарів ґрунту пояснюють 0.44 % варіації цього показнику. Відмінності між роками у вмісті карбону найбільш значно проявляють себе у верхньому шарі ґрунту та зі збільшеннями глибини міжрічні відмінності згаджуються (рис. 5.12). Спостережувані патерни профільного розподілу інтенсивності депонування карбону можуть бути пояснені температурним режимом кожного року. В 2018 році середня річна температура повітря була найменшою, відповідно до чого ми спостерігали найменший рівень емісії по усіх горизонтах та лінійний тренд зменшення профілем ґрунту з глибиною. У 2019 році середня річна температура була вищою і в усіх частинах профілю вміст

карбону стала більшою, при чому лінійний патрен профільного розподілу не змінився.

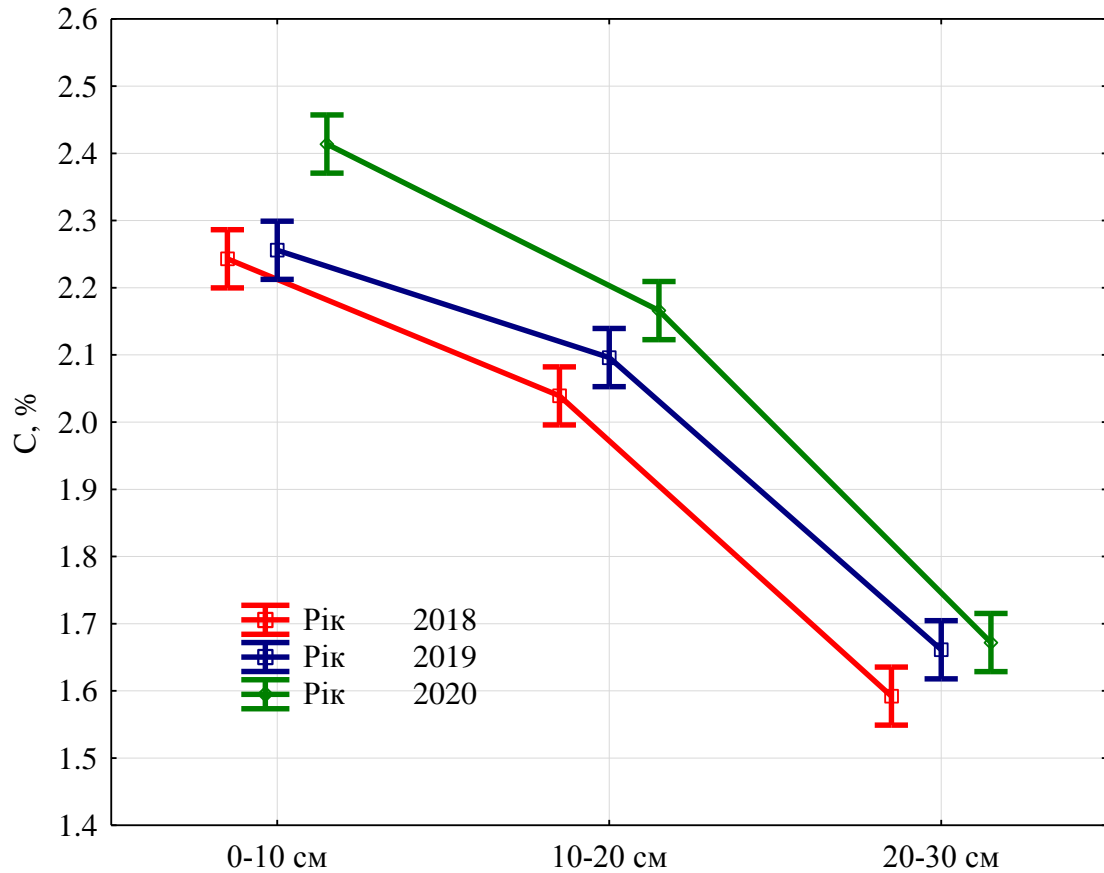


Рис. 5.12. Залежність депонування карбону від взаємодії року та шару ґрунту (вертикальні лінії вказують на 95%-й довірчий інтервал). Ось абсцис – шари ґрунту

У 2020 році середня річна температура була найбільшою. Загальна вміст карбону зростає, але це збільшення було найсуттєвішим саме у верхньому шарі ґрунту. Таким чином, зміни забезпечення теплом впливають як на загальну інтенсивність депонування карбону, так і на профільний розподіл цього показника.

Профільний розподіл вмісту вуглецю залежно від вегетаційного року здатний пояснити 0.28 % варіації цього показника. Загальний патерн профільного розподілу є типовим для усіх вегетаційних періодів, що проявляє себе у зменшенні вмісту карбону з глибиною (рис. 5.13). Вміст карбону



більший на 5-й рік, дещо менший – на 4-й рік та найменший на 3-й рік вегетації.

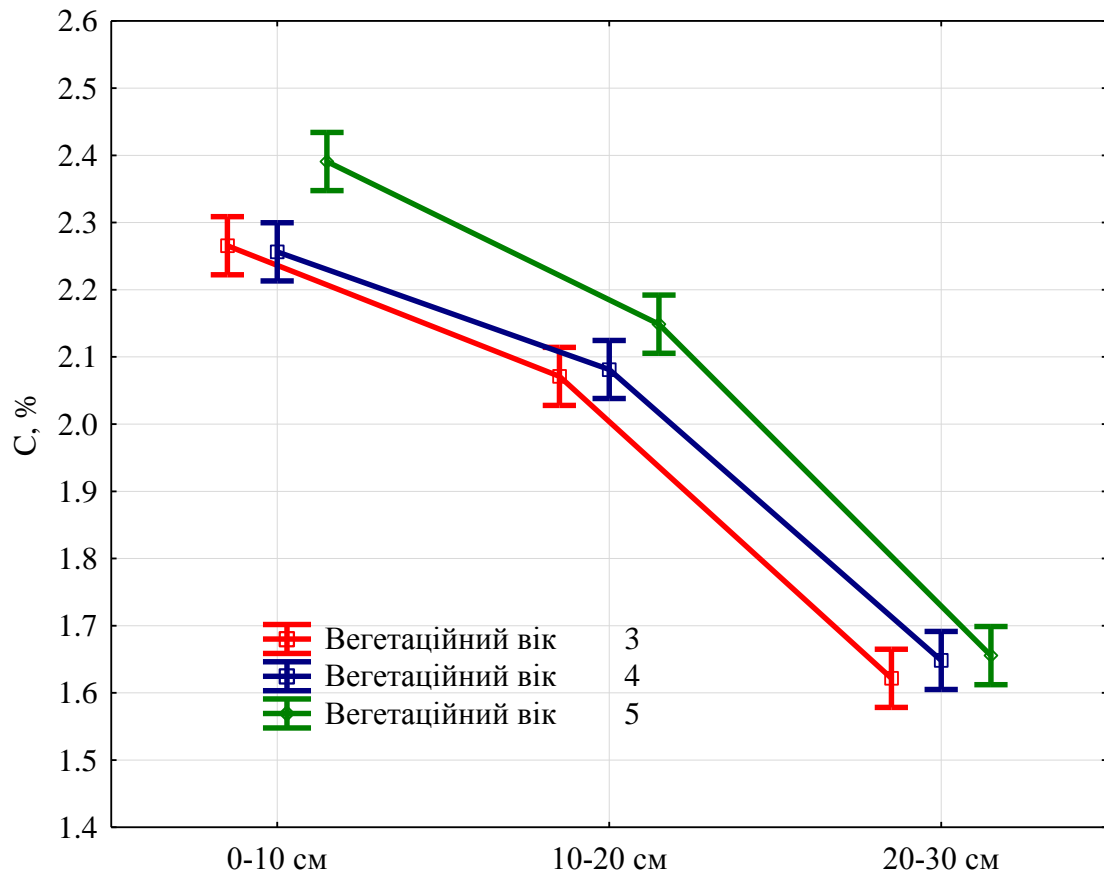


Рис. 5.13. Залежність депонування карбону від взаємодії вегетаційного року та шару ґрунту (вертикальні лінії вказують на 95%-й довірчий інтервал). Ось абсцис – шари ґрунту

Найбільші відмінності між вегетаційними роками за показниками вмісту карбону спостерігаються в верхніх шарах ґрунту і зі збільшенням глибини ці відмінності зменшуються. Очевидно, що більше надходження органічної речовини у верхніх шарах з плином часу вегетації може пояснити спостережувані закономірності. Агрегатоутворення кореневими системами рослин також зростає з плином часу вегетації рослинних угруповань, що також сприяє оптимізації повітряного режиму ґрунтів.

Особливості профільного розподілу депонування карбону залежно від типу культури, яка вирощується, здатні пояснити 1.6 % варіації цього показнику. Для цілини характерним є досить практично лінійне зменшення

вмісту карбону з глибиною (рис. 5.14). Для світчграсу та міскантусу спостерігається різкий перетин тренду зменшення після глибини 10–20 см.

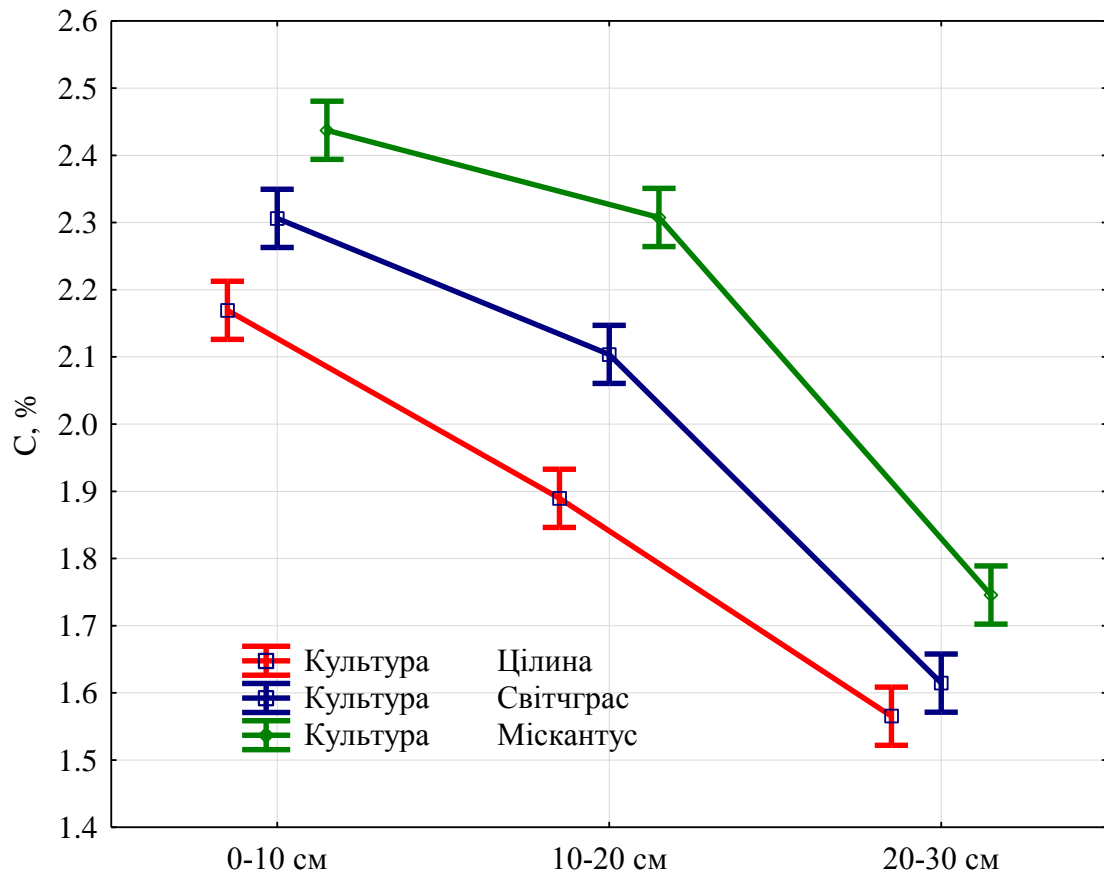


Рис. 5.14. Залежність депонування карбону від взаємодії типу культури та шару ґрунту (вертикальні лінії вказують на 95%-й довірчий інтервал). Ось абсцис – шари ґрунту

Такі особливості можна пояснити профільним розподілом кореневої системи рослин та їх впливу на ґрунт. Енергетичні культури формують масивну мочкувату кореневу систему, яка значно насичує органічною речовиною потужні ґрунтові шари на значну глибину. Також мочкувата коренева система сприяє формуванню водостійкої агрегатної структури ґрунту, яка є умовою оптимізації повітряного та водного режиму ґрунту. Наявність повітря та необхідної кількості води є обов'язковою вимогою нормального функціонування ґрунтової біоти, результатом чого є активізація як процесів мінералізації, так і гуміфікації органічної речовини в ґрунті.

## Висновки за розділом

1. Культура, глибина шару ґрунту, рік та вік вегетації визначають 60 % варіювання депонування карбону в ґрунті. Глибина шару ґрунту є найбільш значним фактором, який здатний пояснити 53.4 % варіювання депонування карбону. Зі зростанням глибини рівень депонування карбону знижується, що можна зв'язати зі зміною щільності кореневих систем рослин.
2. Культура є статистично вірогідним предиктором варіювання депонування карбону та здатна пояснити 8.5 % варіювання цього показника. Ґрунт під цілинною рослинністю характеризується найменшим рівнем вмісту вуглецю (у середньому становить  $1.87 \pm 0.017$  %). Під світчграсом депонування карбону в ґрунті зростає на 7.1 % порівняно з контролем, а під міскантусом зростає на 15.4 % порівняно з контролем.
3. Міжрічне варіювання вмісту вуглецю в ґрунті пояснює 1.2 % мінливості цього показника. 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 міскантусу.

**РОЗДІЛ 6.**  
**АГРОЕКОЛОГІЧНИХ ФАКТОРИ ПРОДУКТИВНОСТІ**  
**ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР**

6.1. Описові статистики динаміки продуктивності енергетичних культур

Продуктивність наземної фітомаси була встановлена для цілинної рослинності (контроль), світчграсу та міскантусу залежно від вегетаційного віку рослинного угруповання та у різні роки (табл. 1).

Таблиця 6.1. Описові статистики варіювання продуктивності наземної фітомаси енергетичних культур (N = 15)

Рік	Веgetаційний вік	Культура	Середнє±ст. помилка, т/га	Мінімум, т/га	Максимум, т/га
2018	3	Цілина	0.9±0.26	0.7	1.8
		Світчграс	9.0±4.54	5.1	16.7
		Міскантус	14.3±3.35	11.5	21.6
	4	Цілина	0.8±0.09	0.7	1.1
		Світчграс	11.3±0.59	10.4	11.9
		Міскантус	15.6±0.90	14.2	16.9
	5	Цілина	0.9±0.10	0.7	1.1
		Світчграс	14.3±2.30	10.5	18.7
		Міскантус	18.2±0.86	16.4	19.6
2019	3	Цілина	1.1±0.22	0.7	1.6
		Світчграс	10.7±1.89	5.4	12.7
		Міскантус	15.2±2.40	12.5	21.5
	4	Цілина	1.1±0.26	0.7	1.7
		Світчграс	15.1±2.31	12.4	19.5
		Міскантус	17.8±0.92	16.4	19.5
	5	Цілина	1.1±0.38	0.7	2.2
		Світчграс	14.7±1.42	12.5	17.5
		Міскантус	21.1±1.07	19.6	22.9
2020	3	Цілина	0.9±0.06	0.8	1.0
		Світчграс	13.7±0.71	12.4	14.7
		Міскантус	16.4±0.72	15.2	17.5
	4	Цілина	0.9±0.06	0.8	1.0
		Світчграс	15.3±0.57	14.2	16.2
		Міскантус	19.7±2.57	17.1	25.2
	5	Цілина	0.9±0.06	0.8	1.0
		Світчграс	16.8±0.58	15.7	17.8
		Міскантус	23.6±0.92	22.1	24.7

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 (рис. 6.1).

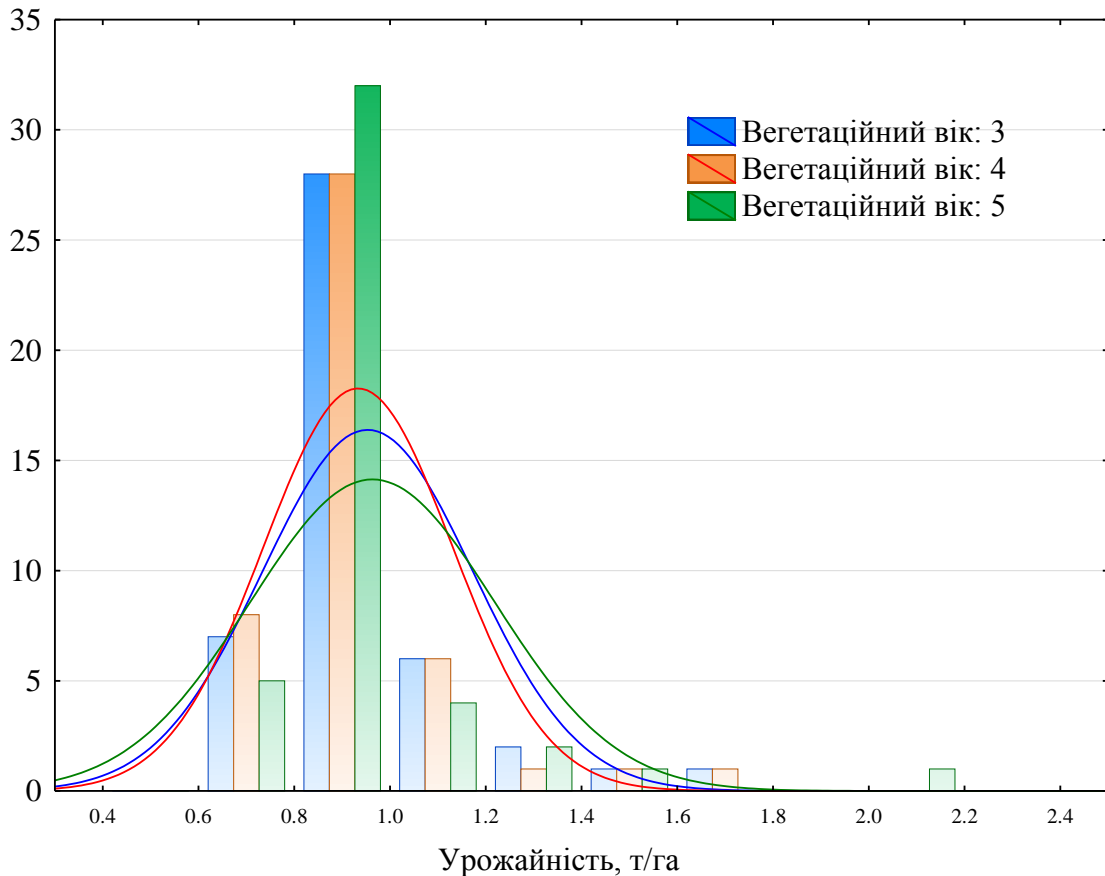


Рис. 6.1. Варіювання надземної продукції цілинної рослинності. Ось абсцис – урожайність, т/га, ось ординат – кількість спостережень

Надземна продукція світчграсу варіює у межах від 5.1 до 16.7 т/га (рис. 6.2). 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 %.

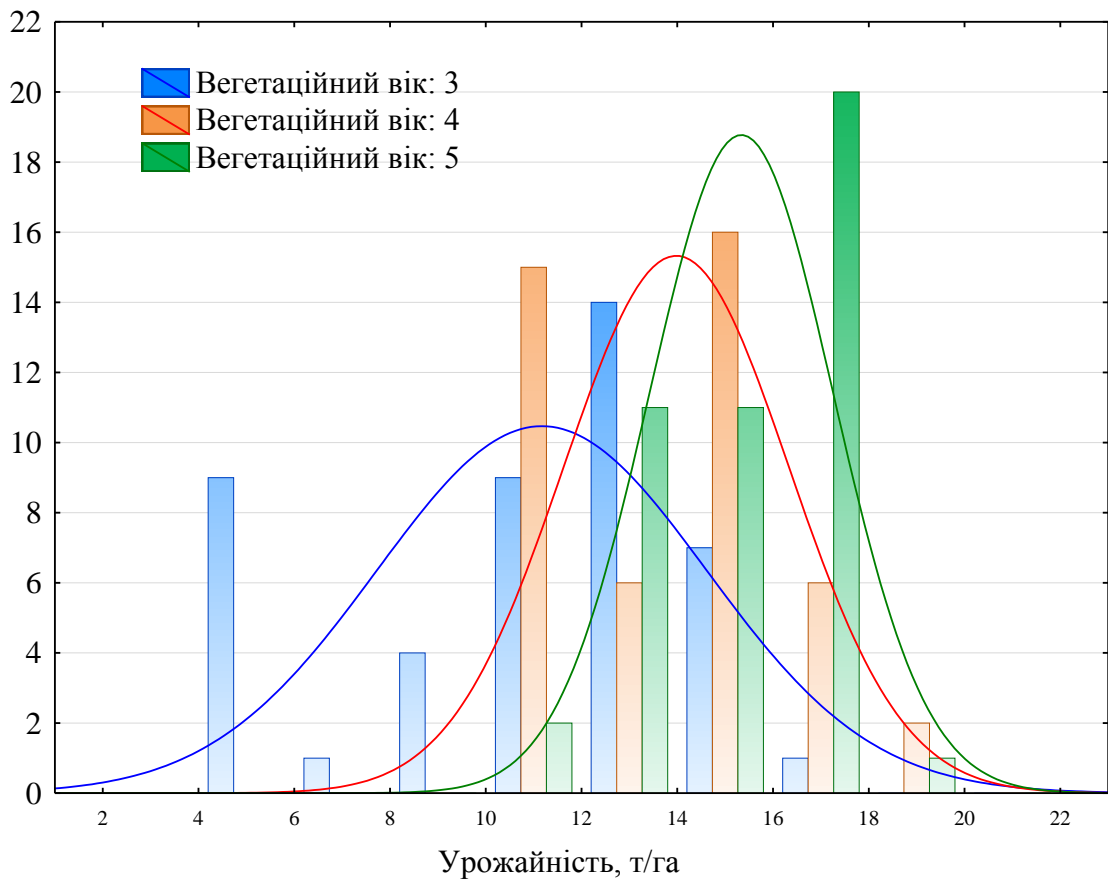


Рис. 6.2. Варіювання надземної продукції угруповання світчграса. Ось абсцис – урожайність, т/га, ось ординат – кількість спостережень

У 5-х 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 (рис. 6.3). З віком наземна 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 %.

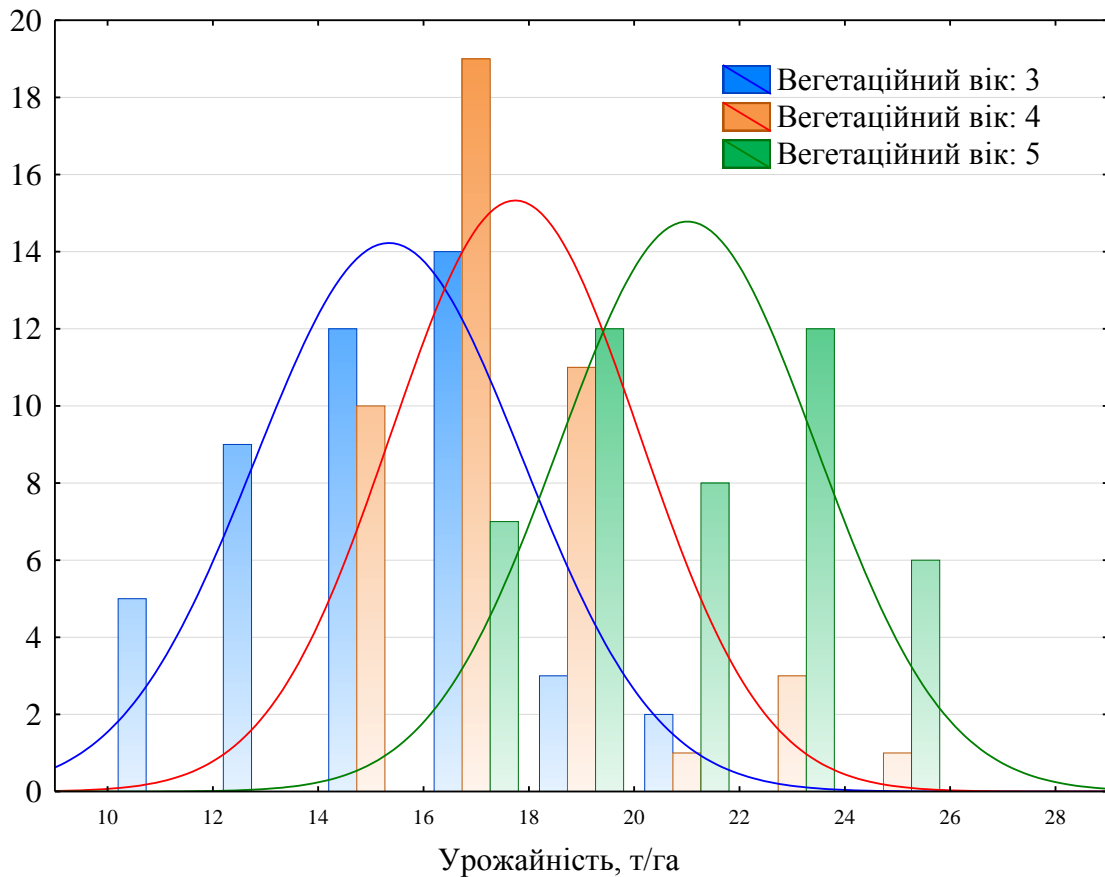


Рис. 6.3. Варіювання надземної продукції угруповання міскантуса. Ось абсцис – урожайність, т/га, ось ординат – кількість спостережень

У 5-х 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 %.

## 6.2. Порівняльний аналіз внеску різних факторів у варіювання надземної продукції енергетичних культур

Культура, рік та вік вегетації визначають 60 % варіювання надземної продукції енергетичних культур (табл. 6.2). Тип культури є найбільшим фактором, який визначає варіювання надземної фіто маси (рис. 6. 4). 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 (рис. 6.5). Світчграс перевищує контрольну продуктивність у 14.2 рази, а міскантус – у 18.9 разів. Відповідно, міскантус є більш продуктивним за світчграс у 1.3 рази.

Таблиця 6.2. 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	–	–

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 (рис. 6.5). 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.



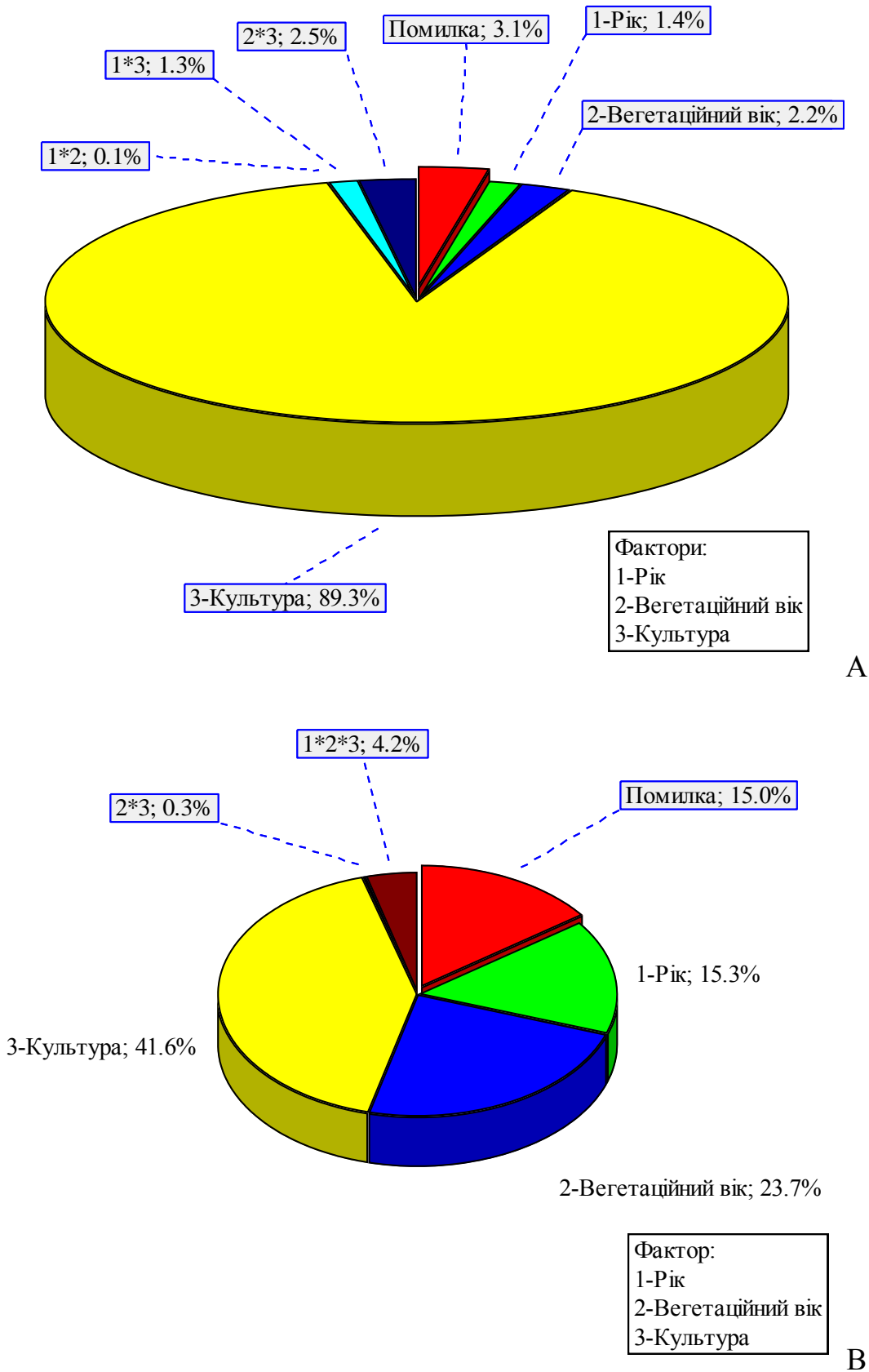


Рис. 6.4. Внесок впливу культури, року та віку вегетації, а також їх взаємодії, у варіацію надземної продукції енергетичних культур. А – з урахуванням контролю; В – тільки для світчграсу та міскантусу

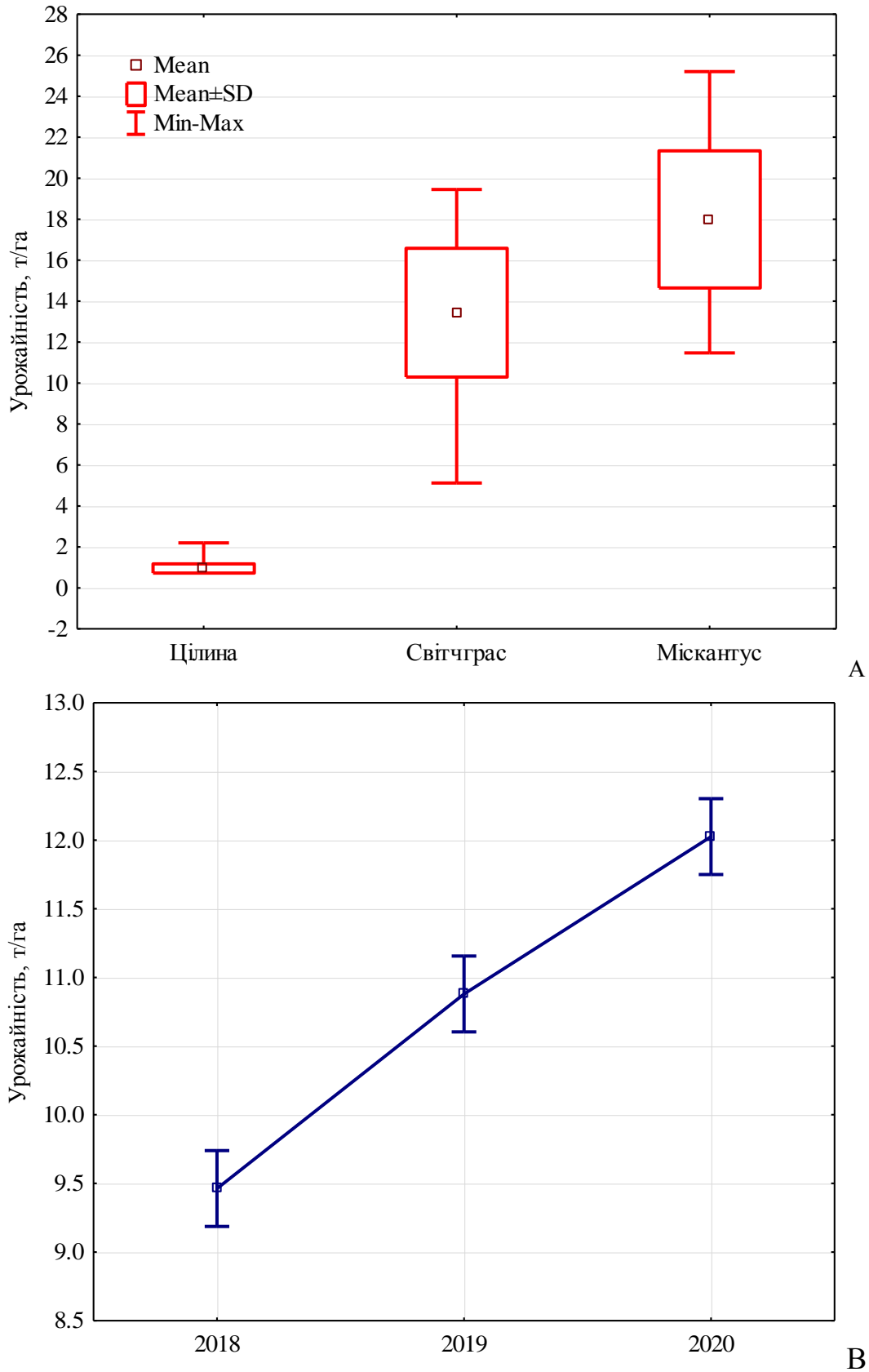


Рис. 6.5. Варіювання надемної продуктивності залежно від культур (А) та року (В)

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. 6.6).

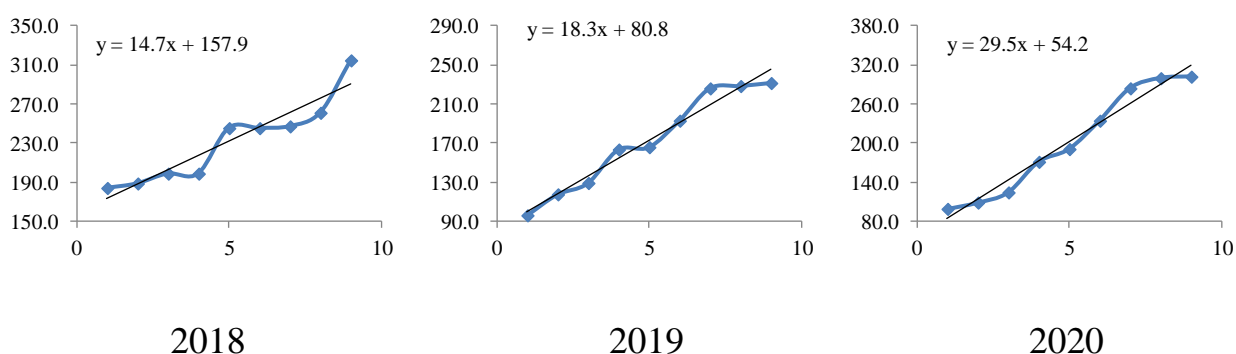


Рис. 6.6. Швидкість зростання кумулятивних опадів за період квітень–червень кожного року. Ось абсцисс – порядок декад з першої декади квітня. Ось ординат – кумулятивні опади з початку року на відповідну декаду. Лінія – апроксимація залежності кумулятивних опадів від часу, який виражений у порядку декад.

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 (рис. 6.7). 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-х річних угруповань збільшення фітомаси становить 14.2 % порівняно з попереднім роком.

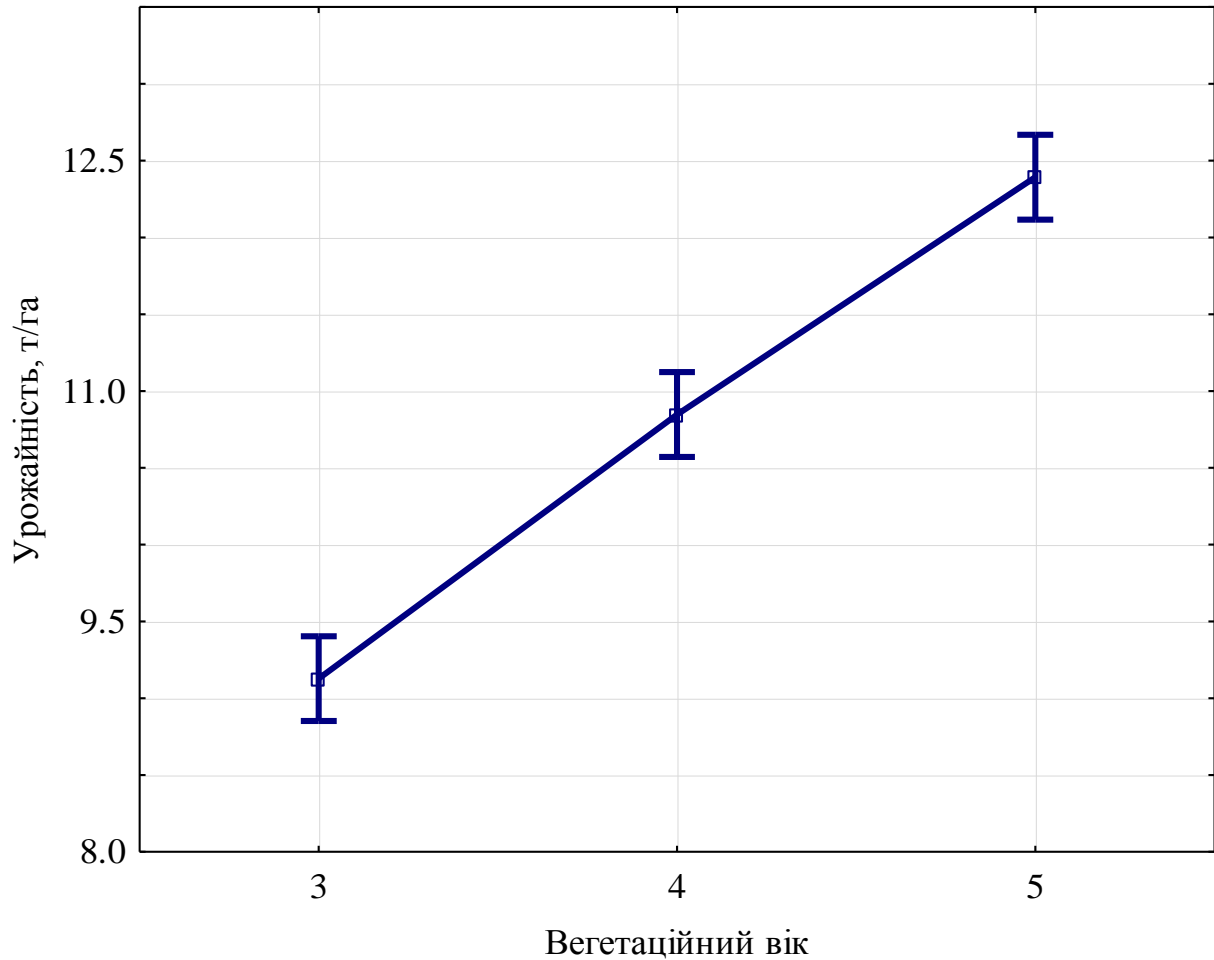


Рис. 6.7. Варіювання надземної продуктивності залежно від віку культур

Ріст багаторічних рослин є причиною збільшення фітомаси їх угруповань.

### 6.3. Оцінка взаємодії факторів у впливі на надземну продуктивність енергетичних культур

Взаємодія року та вегетаційного віку не є статистично вірогідними предикторами для надземної продуктивності енергетичних культур, що вказує на їх незалежність (рис. 6.8). 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.

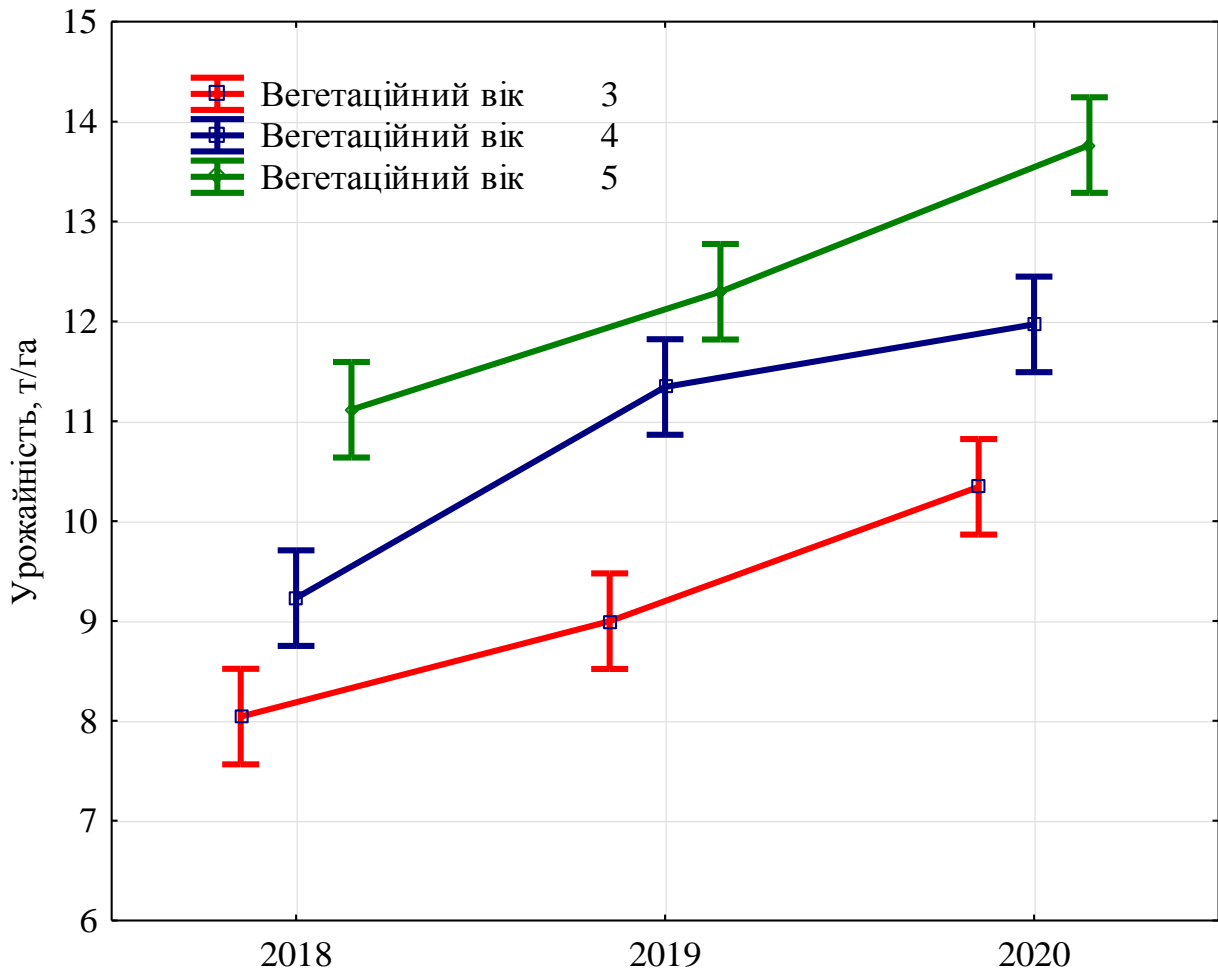


Рис. 6.8. Взаємодія року та вегетаційного віку у впливі на надземну продуктивність енергетичних культур

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 та міжрічну варіацію кліматичних умов від цилінної рослинності (рис. 6.9). Для цилінної рослинності максимум фітомаси спостерігався у 2019 році, тоді як фітомаса у 2018 та 2020 роки була меншою, та не відрізнялась між собою у ці роки.

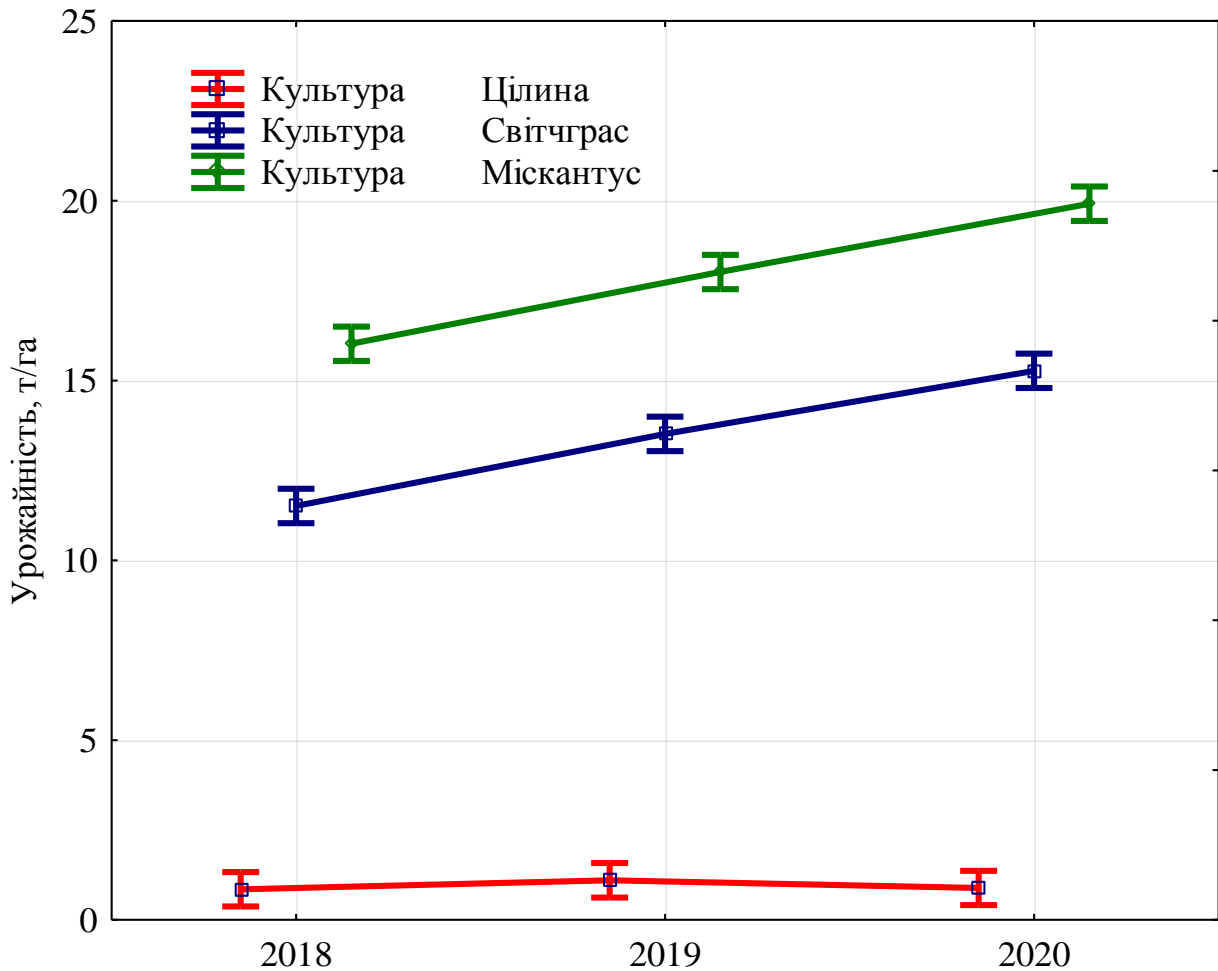


Рис. 6.9. Взаємодія року та культури у впливі на надземну продуктивність енергетичних культур

Для світчграса та міскантуса спостерігалась чітка тенденція до зростання фітомаси протягом періоду досліджень. Рослинни 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 (рис. 6.10). Цілинний рослинний покрив не відрізняється за надземною фітомасою в залежності від віку ( $F = 0.21, p = 0.81$ ).

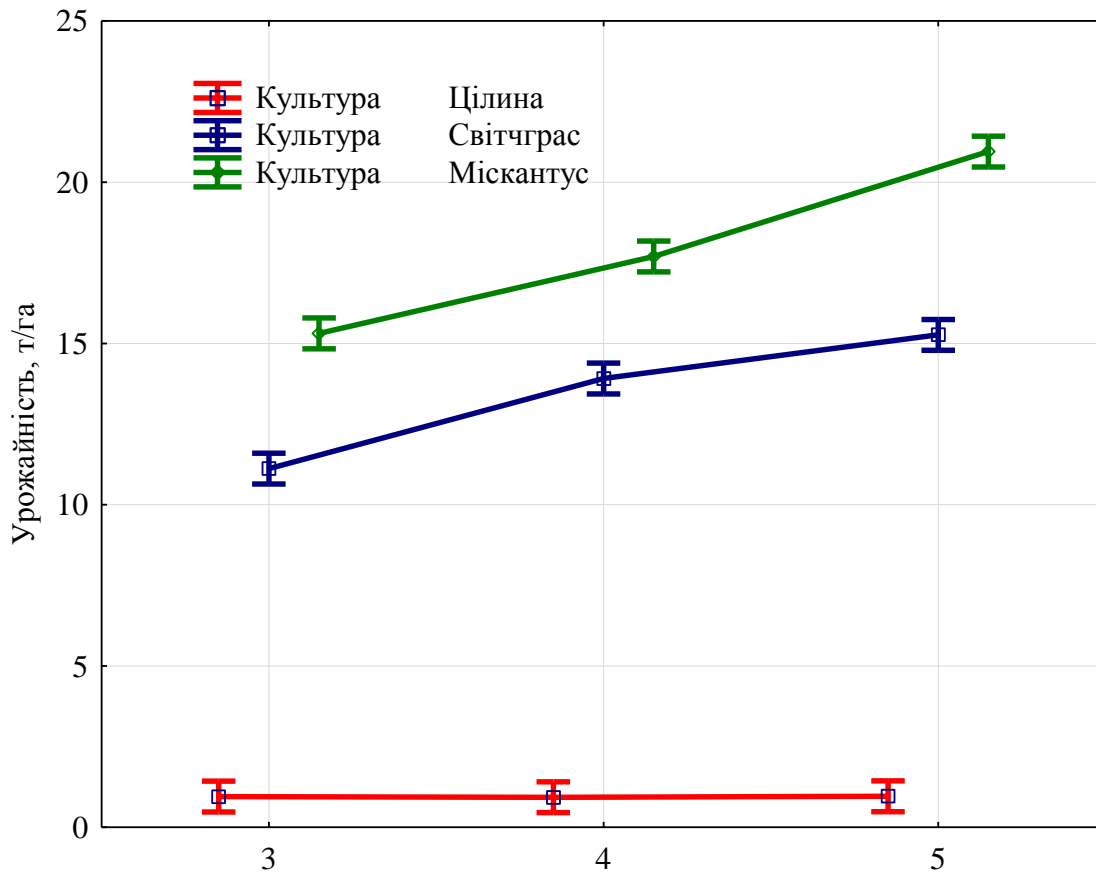


Рис. 6.10. Взаємодія віку та типу культури у впливі на надземну продуктивність енергетичних культур

Надземна фітомаса енергетичних культур збільшується з віком насадження. Швидкість нарощування фітомаси уповільнюється з часом для світчграсу, але збільшується з часом для міскантуса.

#### Висновки за розділом

1. Світчграс перевищує контрольну продуктивність у 14.2 рази, а міскантус – у 18.9 разів. Відповідно, міскантус є більш продуктивним за світчграсу в 1.3 рази. Культура, рік та вік вегетації визначають 60 % варіювання надземної продукції енергетичних культур.

2. Відмінності у фітомасі між роками, які становлять загальний тренд для усіх типів рослинного покриву, визначаються особливостями забезпечення водними ресурсами кожного року. Чутливим предиктором міжрічних відмінностей є швидкість зростання кумулятивних опадів у процесі активної вегетації рослин в період з квітня по кінець червня.
3. З віком рослинного угруповання його фітомаса зростає. Характер відгуку енергетичних культур на вплив факторів середовища є подібним між різними культурами



## РОЗДІЛ 7.

### СТІЙКІСТЬ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЕМІСІЇ ТА ДЕПОНУВАННЯ ВУГЛЕЦЮ В НАСАДЖЕННЯХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР

#### 7.1. Динаміка процесів емісії та депонування вуглецю в контрольних умовах

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 наступним чином:

$$\Delta I/\Delta t = I_{i+1} - I_i, \quad (4)$$

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 показника в наступному році;  $I_i$  – значення показника 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:

$$\Delta E/\Delta t = b_{01} + b_{11} \times E + b_{21} \times C + b_{31} \times Y \quad (5)$$

$$\Delta C/\Delta t = b_{02} + b_{12} \times E + b_{22} \times C + b_{32} \times Y \quad (6)$$

$$\Delta Y/\Delta t = b_{03} + b_{13} \times E + b_{23} \times C + b_{33} \times Y, \quad (7)$$

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;  $b_{01}, \dots, b_{33}$  – регресійні коефіцієнти.

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

$$\begin{cases} 0 = b_{01} + b_{11} \times E + b_{21} \times C + b_{31} \times Y \\ 0 = b_{02} + b_{12} \times E + b_{22} \times C + b_{32} \times Y \\ 0 = b_{03} + b_{13} \times E + b_{23} \times C + b_{33} \times Y \end{cases} \quad (8)$$

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 (табл. 7.1). Статистично вірогідними предикторами швидкості змін емісії оксиду вуглецю з поверхні ґрунту є усі дослідженні параметри системи у поточний час. Парний 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. 7.1). Аналіз спільного впливу параметрів системи на швидкість емісії, що зроблено в рамках множинної регресійної моделі, дає дещо інші результати. Позитивним впливом на емісію є тільки вплив поточного стану емісії оксиду вуглецю, а вміст вуглецю в ґрунті та надземна фітомаса навпаки, стримують зростання емісії.

Статистично вірогідними предикторами швидкості змін вмісту органічного вуглецю в ґрунті є поточний вміст цього елемента в ґрунті та надземна фітомаса. Емісія оксиду вуглецю не є статистично вірогідним предиктором. Можна припустити, що тісна кореляція емісії та біомаси робить

ці предиктори мультиколінераними і позитивний вплив емісії оксиду вуглецю на швидкість змін вмісту вуглецю в ґрунті формально відноситься тільки до впливу надземної фітомаси. У свою чергу, аналіз попарних взаємозв'язків вказує на позитивний вплив на вміст вуглецю в ґрунті як емісії, так і надземної фітомаси. Сам вміст вуглецю є стабілізуючим фактором для швидкості його змін, так як має з ним від'ємну кореляцію.

Таблиця 7.1. Множинна регресійна залежність швидкості змін параметрів системи депонування та емісії вуглецю в контрольних умовах ( $b$  – регресійний коефіцієнт,  $b^*$  – стандартизований регресійний коефіцієнт)

Предиктор	$b^* \pm \text{ст. помилка}$	$b \pm \text{ст. помилка}$	t(260)	p-значення
$\Delta E / \Delta t, R_{adj}^2 = 0.87, F = 258.6, p < 0.001$				
Константа	–	–30.47±1.59	–19.19	<0.001
E	1.00±0.04	0.34±0.01	25.17	<0.001
C	–0.08±0.04	–0.78±0.33	–2.35	0.02
Y	–0.17±0.04	–0.89±0.20	–4.35	<0.001
$\Delta C / \Delta t, R_{adj}^2 = 0.29, F = 13.1, p < 0.001$				
Константа	–	1.05±0.51	2.06	0.04
E	0.04±0.10	0.00±0.00	0.40	0.69
C	–0.55±0.09	–0.62±0.11	–5.80	<0.001
Y	0.22±0.10	0.13±0.07	2.06	0.04
$\Delta Y / \Delta t, R_{adj}^2 = 0.17, F = 7.14, p < 0.001$				
Константа	–	5.03±1.30	3.87	<0.001
E	–0.29±0.11	–0.03±0.01	–2.62	0.01
C	–0.34±0.10	–0.91±0.27	–3.37	<0.001
Y	–0.05±0.11	–0.08±0.17	–0.46	0.65

Статистично вірогідними предикторами змін надземної фітомаси є емісія оксиду вуглецю та вміст вуглецю в ґрунті. Сама фітомаса не є формально статистично вірогідним предиктором. Хоч знову, аналіз попарних взаємодій швидкості змін фітомаси з показниками поточного стану системи, вказує на від'ємну кореляцію швидкості змін з усіма показниками.

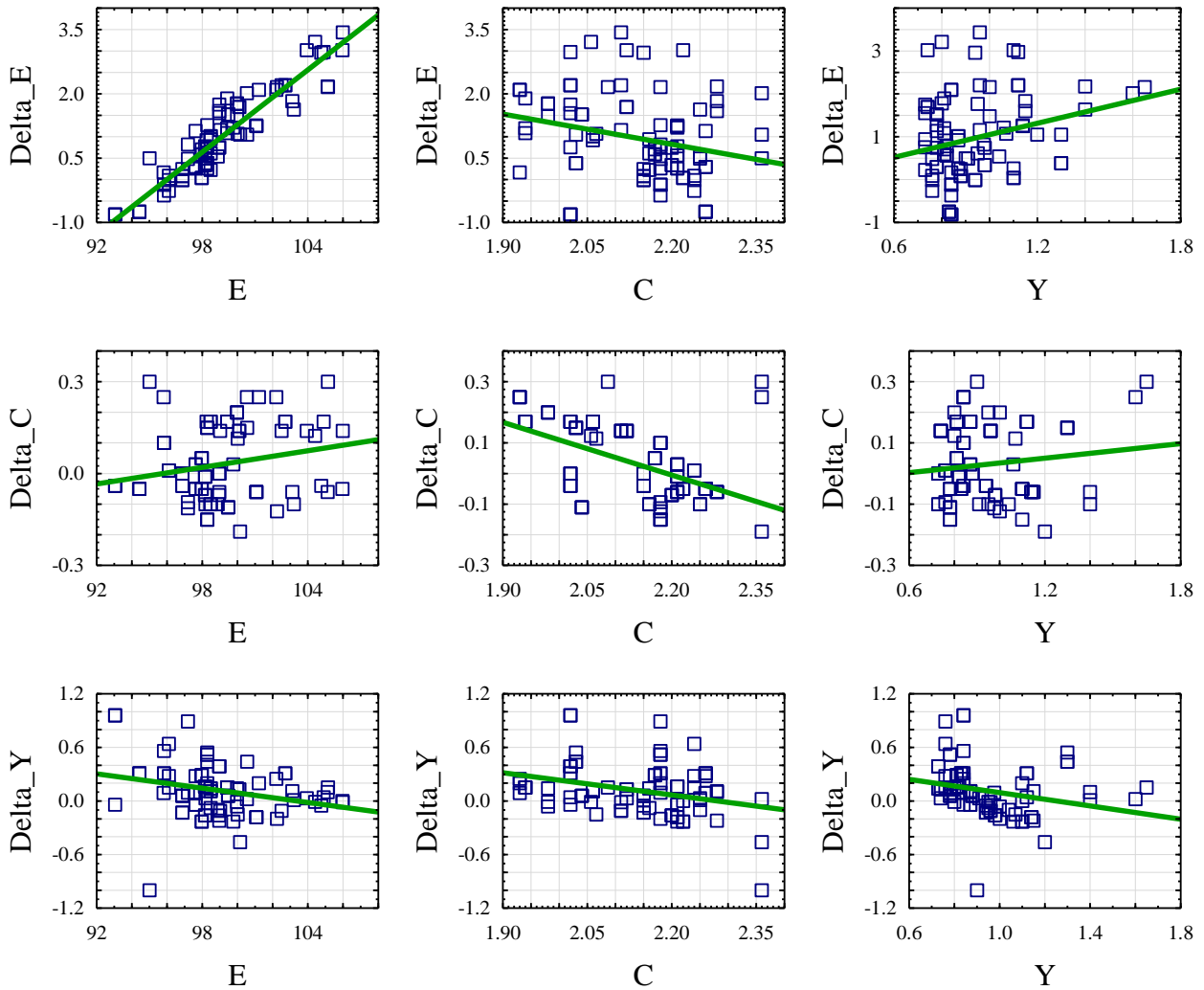


Рис. 7.1. Попарні залежності швидкості змін у часі параметрів системи від їх поточного стану для сіножаті на ціліні. Ось ординат – поточні значення параметрів системи  $E$  – емісія оксиду вуглецю;  $C$  – вміст вуглецю в ґрунті;  $Y$  – надземна фітомаса культури. Ось ординат – швидкість зміни параметрів у часі

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

$$\Delta E/\Delta t = -30.47 + 0.34 \times E - 0.78 \times C - 0.89 \times Y \quad (9)$$

$$\Delta C/\Delta t = 1.05 + 0.00 \times E - 0.62 \times C + 0.13 \times Y \quad (10)$$

$$\Delta Y/\Delta t = 5.03 - 0.03 \times E - 0.91 \times C - 0.08 \times Y \quad (11)$$

Ця система має рішення, яке відповідає стаціонарному стану:  $E = 97.6$  мг/кг/год,  $C = 2.28$  %,  $Y = 1.36$  т/га. Якоб'ян для стаціонарного значення має вигляд:

$$\begin{array}{ccc}
 0.34 & -0.78 & -0.89 \\
 0.00 & -0.62 & 0.13 \\
 -0.03 & -0.91 & -0.08
 \end{array} \tag{12}$$

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.

Стійкість рівноважного стану характеризує довгострокову відповідь системи на маленькі збурення. Але речова частина власного значення якобіану не надає інформації про відповідь на миттєві збурення. У стабільній рівновазі, навіть якщо всі порушення зрештою зникають, миттєва динаміка може бути дуже різною. Ньюберт та Кесвел [244] вперше увели в екологію концепцію реактивності та визначили максимальне можливе відхилення системи у відповідь на збурення. Максимальне початкове збільшення є максимальне власне значення  $H$  – ермітової матриці якобіана.  $H$  є симетричною частиною якобіана  $M$ , визначеної як  $H = (M + M^T)/2$ , де  $M^T$  є транспонування  $M$ . Слід відмітити, що  $H$  є симетричною матрицею, отже всі її власні значення є реальними. Рівновага є реактивною, якщо найбільше власне число  $H$  є позитивним. Рівновага не є від'ємною, якщо власне число  $H$  є від'ємним. Нестабільна рівновага завжди є реактивною, а стабільна рівновага може бути як реактивною, так і нереактивною.

Розрахунки показують, що реактивність системи сіножаті є позитивною та становить  $0.65$ , що вказує на реактивний характер динаміки.

Матриця чутливості до стійкості має вигляд:

$$\begin{array}{ccc}
 & E & C & Y \\
 E & 0.92 & -0.01 & -0.05 \\
 & 0.69 & 0.00 & -0.04 \\
 Y & -1.55 & 0.01 & 0.08
 \end{array} \tag{13}$$

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.

## 7.2. Динаміка процесів емісії та депонування вуглецю в насадження світчграсу

У насадженнях світчграсу поточні показники системи здатні пояснити 65–92 % варіації їх швидкості змін у часі (табл. 7.2).

Таблиця 7.2. Множинна регресійна залежність швидкості змін параметрів системи депонування та емісії вуглецю в насадженнях світчграсу ( $b$  – регресійний коефіцієнт,  $b^*$  – стандартизований регресійний коефіцієнт)

Предиктор	$b^* \pm \text{ст. помилка}$	$b \pm \text{ст. помилка}$	t(260)	p-значення
$\Delta E/\Delta t, R_{adj}^2 = 0.86, F = 178.0, p < 0.001$				
Константа	–	$-7.38 \pm 6.90$	-1.07	0.29
E	$0.53 \pm 0.15$	$0.19 \pm 0.05$	3.59	<0.001
C	$-0.17 \pm 0.04$	$-1.72 \pm 0.42$	-4.15	<0.001
Y	$-1.37 \pm 0.15$	$-1.13 \pm 0.12$	-9.28	<0.001
$\Delta C/\Delta t, R_{adj}^2 = 0.65, F = 55.8, p < 0.001$				
Константа	–	$2.13 \pm 0.62$	3.41	<0.001
E	$-0.50 \pm 0.23$	$-0.01 \pm 0.00$	-2.16	0.03
C	$-0.78 \pm 0.07$	$-0.45 \pm 0.04$	-12.06	<0.001
Y	$0.93 \pm 0.23$	$0.04 \pm 0.01$	4.03	<0.001
$\Delta Y/\Delta t, R_{adj}^2 = 0.92, F = 369.8, p < 0.001$				
Константа	–	$-16.92 \pm 2.51$	-6.75	<0.001
E	$0.97 \pm 0.11$	$0.18 \pm 0.02$	9.19	<0.001
C	$0.10 \pm 0.03$	$0.52 \pm 0.15$	3.46	<0.001
Y	$-1.88 \pm 0.11$	$-0.78 \pm 0.04$	-17.77	<0.001

Відповідні множинні регресійні моделі є статистично вірогідними. Швидкість змін емісії оксиду вуглецю в часі залежить від поточного стану усіх досліджених показників. Результати регресійного аналізу вказують на

те, що швидкість емісії тим більша, чим більший цей показник в поточному році. Інші показники здійснюють стабілізуючий вплив на емісію: за більших значеннях вмісту гумусу та надземної фітомаси емісія оксиду вуглецю з поверхні ґрунту зменшується. Аналіз попарних взаємозв'язків дає дещо інший результат: швидкість емісії від'ємно корелює з усіма предикторами (рис. 7.2).

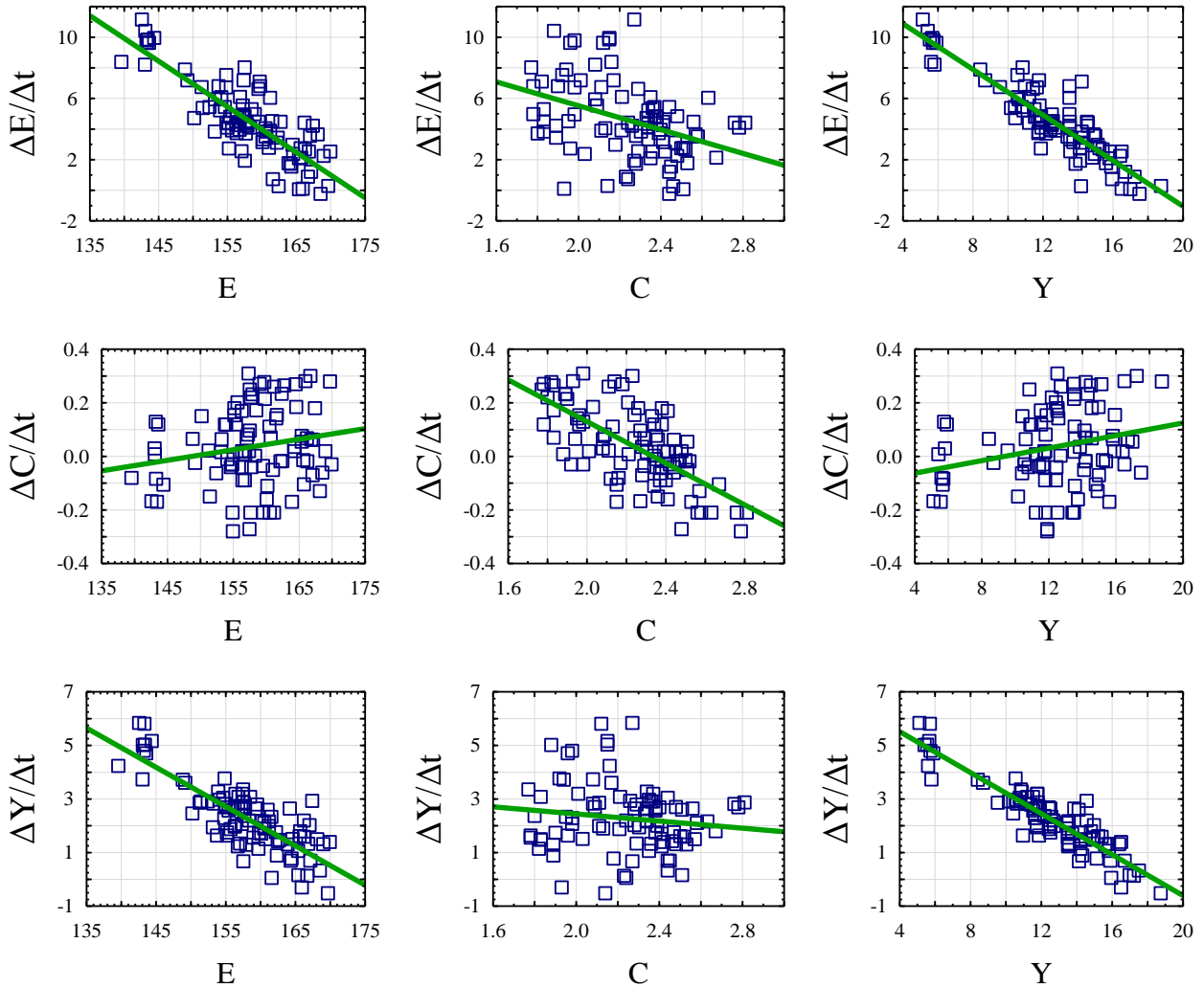


Рис. 7.2. Попарні залежності швидкості змін у часі параметрів системи від їх поточного стану для сіножаті в насадженнях світчграсу. Ось ординат – поточні значення параметрів системи E – емісія оксиду вуглецю; C – вміст вуглецю в ґрунті; Y – надземна фітомаса культури. Ось ординат – швидкість зміни параметрів у часі

Очевидно, що кореляції між предикторами накладають свій відтиск на картину, яку ми одержуємо при попарному порівнянні, а регресійний аналіз дозволяє «препарувати» взаємозв'язки та дати найбільш адекватну картину.

Вплив усіх предикторів є статистично вірогідним для пояснення мінливості швидкості змін у часі вмісту вуглецю в ґрунті під насадженнями світчґрасу. Емісія оксиду вуглецю та вміст вуглецю має стабілізуючий вплив на швидкість змін органічного вуглецю в ґрунті, а надземна фітомаса є стимулятором цього процесу. Попарне порівняння вказує на стимулюючий вплив на вміст вуглецю емісії оксиду вуглецю та надземної фітомаси та на стабілізуючий вплив вмісту вуглецю в ґрунті. Очевидно, що швидкість емісії можна зв'язати з інтенсивністю метаболізму ґрунтової мікрофлори, чим можна пояснити стимулюючий вплив на накопичення органічного вуглецю в ґрунті. Закономірно, що надземна фітомаса корелює з фітомасою підземною, яка є джерелом органічного вуглецю. Слід також враховувати опад та пожнивні залишки, джерелом яких є надземна фітомаса.

На швидкість змін надземної фітомаси позитивно впливають емісія оксиду вуглецю та накопичення органічного вуглецю в ґрунті, а негативно впливає сама фітомаса. Позитивний вплив емісії оксиду вуглецю можна пояснити як наслідок активності ґрунтової біоти, маркером якого є емісія. Органічний вуглець є традиційною ознакою родючості ґрунту. Від'ємний вплив надземної фітомаси на швидкість її зростання слід розглядати в математичному контексті: зростання урожайності на більший рівень для меншого рівня фітомаси є більш вірогідним, ніж для високго рівня, коли фітомаса досягає свого максимального значення. За умов найбільшого можливого значення мінливість фітомаси коливається біля нульового рівня.

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

$$\Delta E/\Delta t = -7.38 + 0.19 \times E - 1.72 \times C - 1.13 \times Y \quad (14)$$

$$\Delta C/\Delta t = 2.13 - 0.01 \times E - 0.45 \times C + 0.04 \times Y \quad (15)$$

$$\Delta Y/\Delta t = -16.92 + 0.18 \times E + 0.52 \times C - 0.78 \times Y \quad (16)$$



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:

$$\begin{pmatrix} 0.19 & -1.72 & -1.13 \\ -0.01 & -0.45 & 0.04 \\ 0.18 & 0.52 & -0.78 \end{pmatrix} \quad (17)$$

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	(18)
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 вуглецю та надземної фітомаси на депонування вуглецю в ґрунті.

### 7.3. Динаміка процесів емісії та депонування вуглецю в насадження міскантусу

Характеристики системи під насадженням міскантусу варіюють в часі зі швидкістю, яка може бути статистично вірогідно пояснена поточними характеристиками системи. Пояснювальна здатність регресійних моделей знаходиться в діапазоні  $69$ – $77$  % (табл. 7.3). Статистично вірогідними предикторами швидкості змін у часі емісії оксиду вуглецю є поточне значення цього показнику та надземна фітомаса насадження міскантусу. Емісія позитивно впливає на швидкість змін у часі цього показнику, а надземна

фітомаса є стабілізуючим фактором. Попарне порівняння вказує на наявність від'ємної кореляції між емісією та усіма предикторами (рис. 7.3).

Статистично вірогідними предикторами швидкості змін вмісту органічного вуглецю в ґрунті є усі показники системи. Емісія та вміст вуглецю є факторами, які стабілізують динаміку вмісту гумусу, а надземна фітомаса прискорює швидкість зростання цього показнику.

Таблиця 7.3. Множинна регресійна залежність швидкості змін параметрів системи депонування та емісії вуглецю в насадженнях міскантусу ( $b$  – регресійний коефіцієнт,  $b^*$  – стандартизований регресійний коефіцієнт)

Предиктор	$b^* \pm \text{ст. помилка}$	$b \pm \text{ст. помилка}$	t(260)	p-значення
$\Delta E / \Delta t, R_{adj}^2 = 0.77, F = 100.9, p < 0.001$				
Константа	–	–4.04±11.05	–0.37	0.72
E	0.32±0.16	0.16±0.08	2.00	0.05
C	–0.12±0.07	–1.02±0.57	–1.77	0.08
Y	–1.10±0.15	–1.07±0.15	–7.23	<0.001
$\Delta C / \Delta t, R_{adj}^2 = 0.69, F = 26.6, p < 0.001$				
Константа	–	2.04±0.83	2.45	0.02
E	–0.47±0.24	–0.01±0.01	–1.92	0.05
C	–0.78±0.10	–0.34±0.04	–7.85	<0.001
Y	0.99±0.23	0.05±0.01	4.24	<0.001
$\Delta Y / \Delta t, R_{adj}^2 = 0.93, F = 564.1, p < 0.001$				
Константа	–	–18.79±2.44	–7.69	<0.001
E	0.82±0.07	0.19±0.02	11.08	<0.001
C	0.04±0.03	0.17±0.13	1.31	0.19
Y	–1.73±0.07	–0.79±0.03	–24.25	<0.001

Зміни надземної фітомаси статистично вірогідно прогнозуються за допомогою емісії оксиду вуглецю та поточного значення надземної фітомаси. Емісія є стимулюючим чинником, а фітомаса – стабілізуючим чинником.

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

$$\Delta E/\Delta t = -4.04 + 0.16 \times E - 1.02 \times C - 1.07 \times Y \quad (19)$$

$$\Delta C/\Delta t = 2.04 - 0.01 \times E - 0.34 \times C + 0.05 \times Y \quad (20)$$

$$\Delta Y/\Delta t = -18.79 + 0.19 \times E + 0.17 \times C - 0.79 \times Y \quad (21)$$

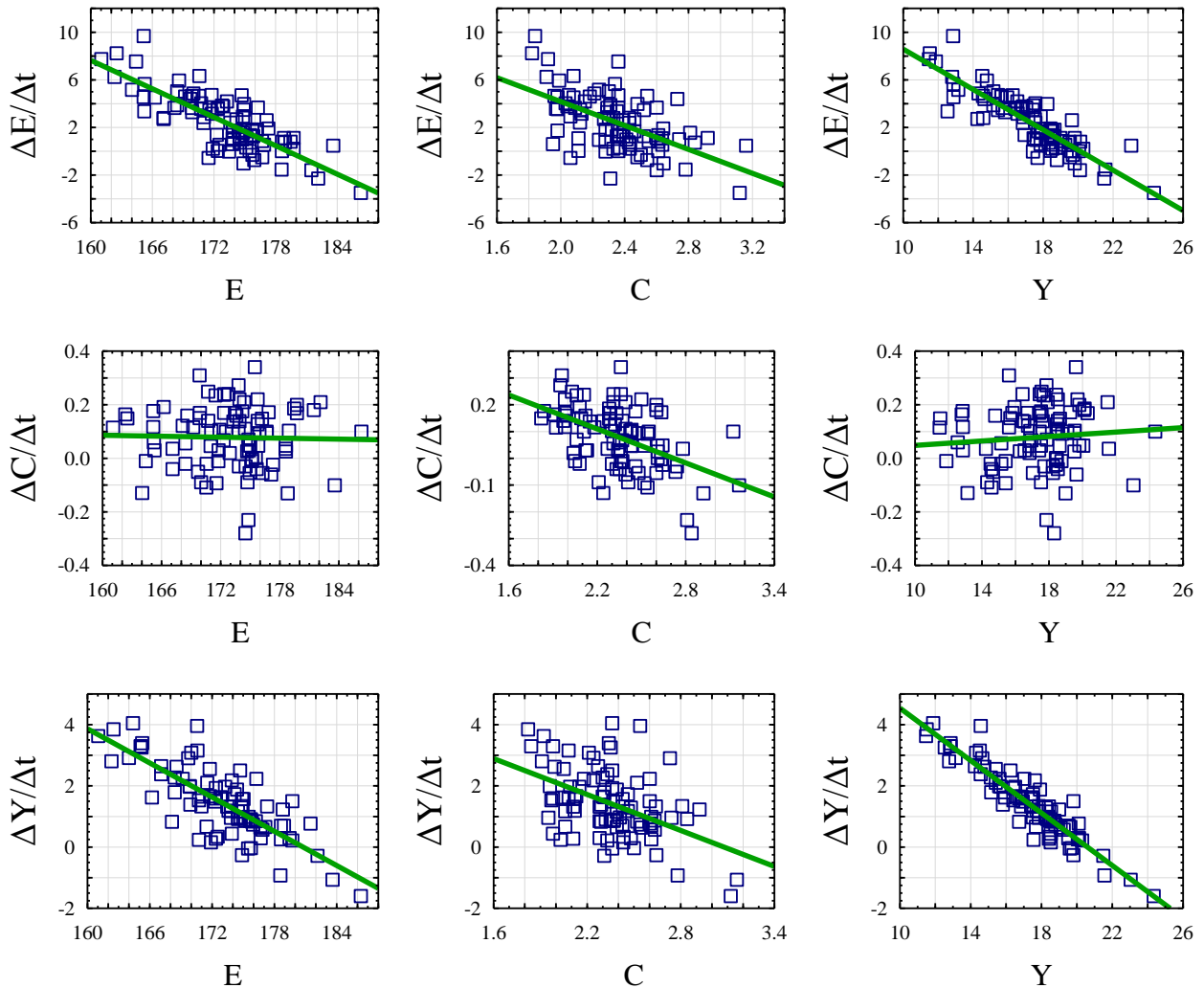


Рис. 7.3. Попарні залежності швидкості змін у часі параметрів системи від їх поточного стану для сіножати в насадженнях міскантусу. Ось ординат – поточні значення параметрів системи  $E$  – емісія оксиду вуглецю;  $C$  – вміст вуглецю в ґрунті;  $Y$  – надземна фітомаса культури. Ось абсцис – швидкість зміни параметрів у часі

Ця система має рішення, яке відповідає стаціонарному стану:  $E = 179.9$  мг/кг/год,  $C = 2.84$  %,  $Y = 18.89$  т/га. Якоб'ян для стаціонарного значення має вигляд:

$$\begin{pmatrix} 0.16 & -1.02 & -1.07 \\ -0.01 & -0.34 & 0.05 \\ 0.19 & 0.17 & -0.79 \end{pmatrix} \quad (22)$$

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	(23)
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 вуглецю та надземної фітомаси на депонування вуглецю в ґрунті.

#### Висновки за розділом

1. 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.
2. Система, яка формується в насадженнях світчграсу, має стаціонарний стан ( $E = 163.4$  мг/кг/год,  $C = 2.63$  %,  $Y = 16.84$  т/га), який є стійким та реактивним. Головним механізмом підтримання стійкості системи 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.

3. Система, яка формується в насадженнях міскантусу, має стаціонарний стан ( $E = 179.9$  мг/кг/год,  $C = 2.84$  %,  $Y = 18.89$  т/га), який є стійким та реактивним. Повернення системи у стан рівноваги буде відбуватися за коливальною траєкторією. Головним механізмом підтримання стійкості системи є стабілізуючий вплив емісії оксиду вуглеця 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 міскантусу.

## ВИСНОВКИ

1. Середня річна температура за період досліджень варіювала в межах від 9,3 до 10,8°C. 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 міскантусу 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 міскантусу, 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 міскантусу. 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 міскантусу.

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 міскантусу, 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 світчґрасу 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 світчґрасу та міскантусу, має стаціонарний стан, який є стійким та реактивним.

8. Головним механізмом підтримання стійкості системи світчґрасу 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 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. Також рекомендовано під час висвітлення 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. 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.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Roozeboom K. L., Wang D., McGowan A. R., Propheter J. L., Staggenborg S. A., Rice C. W. Long-term Biomass and Potential Ethanol Yields of Annual and Perennial Biofuel Crops. *Agron J* 2019;111:74–83. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.03.0172>.
- [2] Laurent A, Pelzer E, Loyce C, Makowski D. Ranking yields of energy crops: A meta-analysis using direct and indirect comparisons. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;46:41–50. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.023>.
- [3] Mantineo M., D'Agosta G. M., Copani V., Patanè C, Cosentino S. L. Biomass yield and energy balance of three perennial crops for energy use in the semi-arid Mediterranean environment. *F Crop Res* 2009;114:204–13. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.07.020>.
- [4] Yuan J. S., Tiller K. H., Al-Ahmad H., Stewart N. R., Stewart C. N. Plants to power: bioenergy to fuel the future. *Trends Plant Sci* 2008;13:421–9. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2008.06.001>.
- [5] Kulyk M.I., Galytska M.A., Samoylik M.S., Zhornyk I.I. Phytoremediation aspects of energy crops use in Ukraine. *Agrology* 2019;2:65–73. <https://doi.org/10.32819/2617-6106.2018.14020>.
- [6] Baxter X.C., Darvell L.I., Jones J.M., Barraclough T., Yates N.E., Shield I. Miscanthus combustion properties and variations with Miscanthus agronomy. *Fuel* 2014;117:851–69. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.09.003>.
- [7] Carpita N. C., Sage R.F. Plants and bioenergy. *J Exp Bot* 2015;66:4093–5. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv311>.
- [8] Mehmood M.A., Ibrahim M., Rashid U., Nawaz M., Ali S., Hussain A., et al. Biomass production for bioenergy using marginal lands. *Sustain Prod Consum* 2017;9:3–21. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2016.08.003>.
- [9] Курило В. Л., Рахметов Д. Б., Кулик М.І . Біологічні особливості та потенціал урожайності енергетичних культур родини тонконогових в

- умовах України. Вісник Полтавської Державної Аграрної Академії 2018;11–7. <https://doi.org/10.31210/visnyk2018.01.01>.
- [10] Pidlisnyuk V., Stefanovska T., Lewis E.E., Erickson L.E., Davis L.C. Miscanthus as a Productive Biofuel Crop for Phytoremediation. *CRC Crit Rev Plant Sci* 2014;33:1–19. <https://doi.org/10.1080/07352689.2014.847616>.
- [11] Lesur-Dumoulin C., Lorin M., Bazot M., Jeuffroy M. H., Loyce C. Analysis of young *Miscanthus × giganteus* yield variability: A survey of farmers' fields in east central France. *GCB Bioenergy* 2016;8:122–35. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12247>.
- [12] Xue S., Lewandowski I., Wang X., Yi Z. Assessment of the production potentials of *Miscanthus* on marginal land in China. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;54:932–43. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.040>.
- [13] Kiesel A., Wagner M., Lewandowski I. Environmental performance of miscanthus, switchgrass and maize: Can C4 perennials increase the sustainability of biogas production? *Sustain* 2017;9. <https://doi.org/10.3390/su9010005>.
- [14] Lemus R., Lal R. Bioenergy crops and carbon sequestration. *CRC Crit Rev Plant Sci* 2005;24:1–21. <https://doi.org/10.1080/07352680590910393>.
- [15] Hannah L. *The Climate System and Climate Change*. *Clim. Chang. Biol.*, Elsevier; 2015, p. 13–53. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420218-4.00002-0>.
- [16] Prasad S., Ingle A. P. Impacts of sustainable biofuels production from biomass. *Sustain. Bioenergy*, Elsevier; 2019, p. 327–46. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817654-2.00012-5>.
- [17] Nsanganwimana F., Pourrut B., Mench M., Douay F. Suitability of *Miscanthus* species for managing inorganic and organic contaminated land and restoring ecosystem services. A review. *J Environ Manage* 2014;143:123–34. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.04.027>.
- [18] Ferreira R. M., Lofrano F.C., Morita D.M. Remediation of contaminated sites: A critical analysis of Brazilian legislation. *Eng Sanit e Ambient* 2020;25:115–25. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522020168968>.

- [19] Gonzalez-de-Soto M., Emmi L., Garcia I., Gonzalez-de-Santos P. Reducing fuel consumption in weed and pest control using robotic tractors. *Comput Electron Agric* 2015;114:96–113. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.04.003>.
- [20] Potapenko O. V. Assessment of phytocoenological diversity of electrical substations territories. *Acta Biol Sib* 2018;4:6. <https://doi.org/10.14258/abs.v4i3.4365>.
- [21] Potapenko O., Kunah O.M., Fedushko M.P. The effect of technological oil spill in soil within electrical generation substations, analysed by ecological regime in the context of relief properties. *Biosyst Divers* 2019;27:43–50. <https://doi.org/10.15421/011907>.
- [22] Meers E., Van Slycken S., Adriaensen K., Ruttens A., Vangronsveld J., Du Laing G., et al. The use of bio-energy crops (*Zea mays*) for ‘phytoattenuation’ of heavy metals on moderately contaminated soils: A field experiment. *Chemosphere* 2010;78:35–41. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.08.015>.
- [23] Meers E., Vandecasteele B., Ruttens A., Vangronsveld J., Tack FMG. Potential of five willow species (*Salix* spp.) for phytoextraction of heavy metals. *Environ Exp Bot* 2007;60:57–68. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2006.06.008>.
- [24] de Abreu C.A., Coscione A.R., Pires A.M., Paz-Ferreiro J. Phytoremediation of a soil contaminated by heavy metals and boron using castor oil plants and organic matter amendments. *J Geochemical Explor* 2012;123:3–7. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.04.013>.
- [25] Pandey A., Mishra S.K., Gautam A.K. Soil Erosion Modeling Using Satellite Rainfall Estimates. *J Water Resour Hydraul Eng* 2015;4:318–25. <https://doi.org/10.5963/jwrhe0404002>.
- [26] Witters N., Mendelsohn R. O., Van Slycken S , Weyens N., Schreurs E., Meers E., et al. Phytoremediation, a sustainable remediation technology? Conclusions from a case study. I: Energy production and carbon dioxide

- abatement. *Biomass and Bioenergy* 2012;39:454–69. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.08.016>.
- [27] Quinn Ld., Allen Dj., Stewart Jr. Invasiveness potential of *Miscanthus sinensis*: implications for bioenergy production in the United States. *GCB Bioenergy* 2010;2:310–20. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2010.01062.x>.
- [28] Técher D., Laval-Gilly P., Henry S., Bennisroune A., Formanek P., Martinez-Chois C., et al. Contribution of *Miscanthus x giganteus* root exudates to the biostimulation of PAH degradation: An in vitro study. *Sci Total Environ* 2011;409:4489–95. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.049>.
- [29] Hromádka L., Vranová V., Techer D., Laval-Gilly P., Rejšek K., Formánek P., et al. Composition of root exudates of *Miscanthus × Giganteus* Greef et Deu. *Acta Univ Agric Silvic Mendelianae Brun* 2014;58:71–6. <https://doi.org/10.11118/actaun201058010071>.
- [30] Bellamy P. E., Croxton P. J., Heard M. S., Hinsley S. A., Hulmes L., Hulmes S., et al. The impact of growing miscanthus for biomass on farmland bird populations. *Biomass and Bioenergy* 2009;33:191–9. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.07.001>.
- [31] Boehmel C., Lewandowski I., Claupein W. Comparing annual and perennial energy cropping systems with different management intensities. *Agric Syst* 2008;96:224–36. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2007.08.004>.
- [32] Zadorozhnaya G. A., Andrusevych K. V., Zhukov O.V. Soil heterogeneity after recultivation: Ecological aspect. *Folia Oecologica* 2018;45:46–52. <https://doi.org/10.2478/foecol-2018-0005>.
- [33] Chen M., Xu P., Zeng G., Yang C., Huang D., Zhang J. Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavy metals by composting: Applications, microbes and future research needs. *Biotechnol Adv* 2015;33:745–55. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.05.003>.
- [34] Smith S. R. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge.

- Environ Int 2009;35:142–56. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.06.009>.
- [35] Korchagina K. V., Smagin A. V., Reshetina T. V. Assessing the technogenic contamination of urban soils from the profile distribution of heavy metals and the soil bulk density. *Eurasian Soil Sci* 2014;47:824–33. <https://doi.org/10.1134/S1064229314080080>.
- [36] Shamilishvili G., Abakumov E. Organic and inorganic contaminants in Urban Soils of St. Petersburg (Russia). Springer Geogr., Springer; 2019, p. 51–7. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-89602-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-89602-1_7).
- [37] Diami S. M., Kusin F. M., Madzin Z. Potential ecological and human health risks of heavy metals in surface soils associated with iron ore mining in Pahang, Malaysia. *Environ Sci Pollut Res* 2016;23:21086–97. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7314-9>.
- [38] Wall D. H, Nielsen U. N, Six J. Soil biodiversity and human health. *Nature* 2015;528:69–76. <https://doi.org/10.1038/nature15744>.
- [39] Kao Y.C., Rogers M. W., Bunnell D.B, Cowx I. G, Qian S. S., Anneville O., et al. Effects of climate and land-use changes on fish catches across lakes at a global scale. *Nat Commun* 2020;11:1–14. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14624-2>.
- [40] Tsiafouli M.A., Thébault E., Sgardelis S.P., de Ruiter P.C., van der Putten W.H., Birkhofer K., et al. Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Glob Chang Biol* 2015;21:973–85. <https://doi.org/10.1111/gcb.12752>.
- [41] Collins S.J., Bellingham L., Mitchell G.W., Fahrig L. Life in the slow drain: Landscape structure affects farm ditch water quality. *Sci Total Environ* 2019;656:1157–67. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.400>.
- [42] Nsanganwimana F., Pourrut B., Mench M., Douay F. Suitability of *Miscanthus* species for managing inorganic and organic contaminated land and restoring ecosystem services. A review. *J Environ Manage* 2014;143:123–34. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.04.027>.
- [43] Nsanganwimana F., Pourrut B., Waterlot C., Louvel B., Bidar G., Labidi S., et al. Metal accumulation and shoot yield of *Miscanthus×giganteus* growing in

- contaminated agricultural soils: Insights into agronomic practices. *Agric Ecosyst Environ* 2015;213:61–71. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.07.023>.
- [44] Flathman P.E., Lanza G.R. Phytoremediation: Current Views on an Emerging Green Technology. *J Soil Contam* 1998;7:415–32. <https://doi.org/10.1080/10588339891334438>.
- [45] Kumar PBAN, Dushenkov V., Motto H., Raskin I. Phytoextraction: The Use of Plants To Remove Heavy Metals from Soils. *Environ Sci Technol* 1995;29:1232–8. <https://doi.org/10.1021/es00005a014>.
- [46] Pandey V.C., Bajpai O., Singh N. Energy crops in sustainable phytoremediation. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;54:58–73. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.078>.
- [47] Nurzhanova A., Pidlisnyuk V., Abit K., Nurzhanov C., Kenessov B., Stefanovska T., et al. Comparative assessment of using miscanthus × giganteus for remediation of soils contaminated by heavy metals: A case of military and mining sites. *Environ Sci Pollut Res* 2019;26:13320–33. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04707-z>.
- [48] Wuana R.A, Okieimen F.E. Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *ISRN Ecol* 2011;2011:1–20. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>.
- [49] Willison Jh.M., Li R., Yuan X. Conservation and ecofriendly utilization of wetlands associated with the Three Gorges Reservoir. *Environ Sci Pollut Res* 2013;20:6907–16. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1438-3>.
- [50] Rayu S., Karpouzias D.G., Singh B.K. Emerging technologies in bioremediation: Constraints and opportunities. *Biodegradation* 2012;23:917–26. <https://doi.org/10.1007/s10532-012-9576-3>.
- [51] Gomes H.I. Phytoremediation for bioenergy: challenges and opportunities. *Environ Technol Rev* 2012;1:59–66. <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.696715>.
- [52] Cao A., Cappai G., Carucci A., Lai T. Heavy metal bioavailability and chelate mobilization efficiency in an assisted phytoextraction process. *Environ*

- Geochem Health 2008;30:115–9. <https://doi.org/10.1007/s10653-008-9136-2>.
- [53] Cheraghi M., Lorestani B., Khorasani N., Yousefi N., Karami M. Findings on the Phytoextraction and Phytostabilization of Soils Contaminated with Heavy Metals. Biol Trace Elem Res 2011;144:1133–41. <https://doi.org/10.1007/s12011-009-8359-0>.
- [54] Bourgeois E., Dequiedt S., Lelièvre M., van Oort F., Lamy I., Ranjard L., et al. Miscanthus bioenergy crop stimulates nutrient-cycler bacteria and fungi in wastewater-contaminated agricultural soil. Environ Chem Lett 2015;13:503–11. <https://doi.org/10.1007/s10311-015-0532-4>.
- [55] Pidlisnyuk V., Stefanovska T., Lewis E.E., Erickson L.E., Davis L.C. Miscanthus as a Productive Biofuel Crop for Phytoremediation. CRC Crit Rev Plant Sci 2014;33:1–19. <https://doi.org/10.1080/07352689.2014.847616>.
- [56] Pidlisnyuk V. V., Erickson L.E., Trögl J., Shapoval P.Y., Popelka J., Davis L.C., et al. Metals uptake behaviour in Miscanthus x giganteus plant during growth at the contaminated soil from the military site in Sliač, Slovakia. Polish J Chem Technol 2018;20:1–7. <https://doi.org/10.2478/pjct-2018-0016>.
- [57] Pidlisnyuk V., Erickson L., Stefanovska T., Popelka J., Hettiarachchi G., Davis L., et al. Potential phytomanagement of military polluted sites and biomass production using biofuel crop miscanthus x giganteus. Environ Pollut 2019;249:330–7. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.018>.
- [58] Kharytonov M., Pidlisnyuk V., Stefanovska T., Babenko M., Martynova N., Rula I. The estimation of Miscanthus×giganteus’ adaptive potential for cultivation on the mining and post-mining lands in Ukraine. Environ Sci Pollut Res 2019;26:2974–86. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3741-0>.
- [59] Liu Y-N., Guo Z-H., Xiao X-Y., Wang S., Jiang Z-C., Zeng P. Phytostabilisation potential of giant reed for metals contaminated soil modified with complex organic fertiliser and fly ash: A field experiment. Sci Total Environ 2017;576:292–302. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.065>.
- [60] Kayama M. Comparison of the Aluminum Tolerance of Miscanthus sinensis



- Anderss. and *Miscanthus sacchariflorus* Bentham in Hydroculture. *Int J Plant Sci* 2001;162:1025–31. <https://doi.org/10.1086/322890>.
- [61] Al Souki K.S., Louvel B., Douay F., Pourrut B. Assessment of *Miscanthus x giganteus* capacity to restore the functionality of metal-contaminated soils: Ex situ experiment. *Appl Soil Ecol* 2017;115:44–52. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.03.002>.
- [62] Gaitán J.J., Bran D.E., Oliva G.E., Aguiar M.R., Buono G.G., Ferrante D., et al. Aridity and Overgrazing Have Convergent Effects on Ecosystem Structure and Functioning in Patagonian Rangelands. *L Degrad Dev* 2018;29:210–8. <https://doi.org/10.1002/ldr.2694>.
- [63] Zub H.W., Brancourt-Hulmel M. Agronomic and Physiological Performances of Different Species of *Miscanthus*, a Major Energy Crop. *Sustain. Agric.* Vol. 2, Dordrecht: Springer Netherlands; 2011, p. 469–86. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-0394-0\\_21](https://doi.org/10.1007/978-94-007-0394-0_21).
- [64] Evangelou M.W.H., Papazoglou E.G., Robinson B.H., Schulin R. Phytomanagement: Phytoremediation and the Production of Biomass for Economic Revenue on Contaminated Land. *Phytoremediation*, Cham: Springer International Publishing; 2015, p. 115–32. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-10395-2\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10395-2_9).
- [65] Korzeniowska J., Stanislawska-Glubiak E. Phytoremediation potential of *Miscanthus x giganteus* and *Spartina pectinata* in soil contaminated with heavy metals. *Environ Sci Pollut Res* 2015;22:11648–57. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4439-1>.
- [66] Tripathi R.P., Ogbazghi W., Amlsom S., Measho S. Runoff Harvesting and Storage for Rice Crop at Hamelmalo, Semiarid Region of Eritrea. *Comput Water, Energy, Environ Eng* 2016;05:1–9. <https://doi.org/10.4236/cweee.2016.51001>.
- [67] Antonkiewicz J., Kołodziej B., Bielińska E.J. The use of reed canary grass and giant miscanthus in the phytoremediation of municipal sewage sludge. *Environ Sci Pollut Res* 2016;23:9505–17. <https://doi.org/10.1007/s11356-016->

6175-6.

- [68] Kołodziej B., Antonkiewicz J., Sugier D. *Miscanthus*×*giganteus* as a biomass feedstock grown on municipal sewage sludge. *Ind Crops Prod* 2016;81:72–82. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.11.052>.
- [69] Stewart Jr., Toma Y., Fernández Fg., Nishiwaki A., Yamada T., Bollero G. The ecology and agronomy of *Miscanthus sinensis* , a species important to bioenergy crop development, in its native range in Japan: a review. *GCB Bioenergy* 2009;1:126–53. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2009.01010.x>.
- [70] Parrish D.J., Fike J.H. Selecting, Establishing, and Managing Switchgrass (*Panicum virgatum*) for Biofuels. *Biofuels. Methods Mol. Biol. (Methods Protoc., Totowa, NJ: Humana Press; 2009, p. 27–40*. [https://doi.org/10.1007/978-1-60761-214-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-60761-214-8_2).
- [71] Salam M. A., Kaipainen E., Mohsin M., Villa A., Kuittinen S., Pulkkinen P., et al. Effects of contaminated soil on the growth performance of young *Salix* ( *Salix schwerinii* E. L. Wolf) and the potential for phytoremediation of heavy metals. *J Environ Manage* 2016;183:467–77. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.082>.
- [72] Chou C-H. *Miscanthus* plants used as an alternative biofuel material: The basic studies on ecology and molecular evolution. *Renew Energy* 2009;34:1908–12. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.12.027>.
- [73] Brosse N., Dufour A., Meng X., Sun Q., Ragauskas A. *Miscanthus* : a fast-growing crop for biofuels and chemicals production. *Biofuels, Bioprod Biorefining* 2012;6:580–98. <https://doi.org/10.1002/bbb.1353>.
- [74] Marín F., Sánchez J.L., Arauzo J., Fuertes R., Gonzalo A. Semicemical pulping of *Miscanthus giganteus*. Effect of pulping conditions on some pulp and paper properties. *Bioresour Technol* 2009;100:3933–40. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.011>.
- [75] Velásquez J.A., Ferrando F., Salvadó J. Binderless fiberboard from steam exploded *Miscanthus sinensis* : The effect of a grinding process. *Holz Als Roh- Und Werkst* 2002;60:297–302. <https://doi.org/10.1007/s00107-002-0304-2>.

- [76] Park H.J., Oh S.W., Wen M.Y. Manufacture and properties of Miscanthus–wood particle composite boards. *J Wood Sci* 2012;58:459–64. <https://doi.org/10.1007/s10086-012-1262-x>.
- [77] Techer D., Martinez-Chois C., Laval-Gilly P., Henry S, Bennasroune A, D’Innocenzo M, et al. Assessment of *Miscanthus* × *giganteus* for rhizoremediation of long term PAH contaminated soils. *Appl Soil Ecol* 2012;62:42–9. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.07.009>.
- [78] Davis S.C., Parton W.J., Dohleman F.G., Smith C.M., Grosso S Del., Kent A.D., et al. Comparative Biogeochemical Cycles of Bioenergy Crops Reveal Nitrogen-Fixation and Low Greenhouse Gas Emissions in a *Miscanthus* × *giganteus* Agro-Ecosystem. *Ecosystems* 2010;13:144–56. <https://doi.org/10.1007/s10021-009-9306-9>.
- [79] Ezaki B., Nagao E., Yamamoto Y., Nakashima S., Enomoto T. Wild plants, *Andropogon virginicus* L. and *Miscanthus sinensis* Anders, are tolerant to multiple stresses including aluminum, heavy metals and oxidative stresses. *Plant Cell Rep* 2008;27:951–61. <https://doi.org/10.1007/s00299-007-0503-8>.
- [80] Murphy I.J., Coats J.R. The capacity of switchgrass (*Panicum virgatum*) to degrade atrazine in a phytoremediation setting. *Environ Toxicol Chem* 2011;30:715–22. <https://doi.org/10.1002/etc.437>.
- [81] Murphy B.W. Impact of soil organic matter on soil properties—a review with emphasis on Australian soils. *Soil Res* 2015;53:605. <https://doi.org/10.1071/SR14246>.
- [82] Chen B.C., Lai H.Y., Juang K.W. Model evaluation of plant metal content and biomass yield for the phytoextraction of heavy metals by switchgrass. *Ecotoxicol Environ Saf* 2012;80:393–400. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.04.011>.
- [83] Adebo O.A. African Sorghum-Based Fermented Foods: Past, Current and Future Prospects. *Nutrients* 2020;12:1111. <https://doi.org/10.3390/nu12041111>.
- [84] Zhang K., Johnson L., Vara Prasad P.V., Pei Z., Wang D. Big bluestem as a

- bioenergy crop: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;52:740–56. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.144>.
- [85] Lai L., Kumar S., Osborne S., Owens V. N. Switchgrass impact on selected soil parameters, including soil organic carbon, within six years of establishment. *CATENA* 2018;163:288–96. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.030>.
- [86] Gruss I., Stefanovska T., Twardowski J., Pidlisnyuk V., Shapoval P. The ecological risk assessment of soil contamination with Ti and Fe at military sites in Ukraine: avoidance and reproduction tests with *Folsomia candida*. *Rev Environ Health* 2019;34:303–7. <https://doi.org/10.1515/reveh-2018-0067>.
- [87] Alasmay Z., Todd T., Hettiarachchi G.M., Stefanovska T., Pidlisnyuk V., Roozeboom K., et al. Effect of Soil Treatments and Amendments on the Nematode Community under *Miscanthus* Growing in a Lead Contaminated Military Site. *Agronomy* 2020;10:1727. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111727>.
- [88] Gruss I., Stefanovska T., Twardowski J., Pidlisnyuk V., Shapoval P. The ecological risk assessment of soil contamination with Ti and Fe at military sites in Ukraine: avoidance and reproduction tests with *Folsomia candida*. *Rev Environ Health* 2019;34:303–7. <https://doi.org/10.1515/reveh-2018-0067>.
- [89] Tripathi V., Edrisi S.A., Abhilash P.C. Towards the coupling of phytoremediation with bioenergy production. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;57:1386–9. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.116>.
- [90] Pogrzeba M., Krzyżak J., Sas-Nowosielska A. Environmental hazards related to *Miscanthus x giganteus* cultivation on heavy metal contaminated soil. *E3S Web Conf* 2013;1:29006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20130129006>.
- [91] Fijalkowski K., Rosikon K., Grobelak A., Hutchison D., Kacprzak M.J. Modification of properties of energy crops under Polish condition as an effect of sewage sludge application onto degraded soil. *J Environ Manage* 2018;217:509–19. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.132>.
- [92] Abhilash P.C., Yunus M. Can we use biomass produced from

- phytoremediation? *Biomass and Bioenergy* 2011;35:1371–2.  
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.013>.
- [93] Gawronski S.W., Gawronska H., Lomnicki S., Sæbo A., Vangronsveld J. Plants in Air Phytoremediation. *Adv. Bot. Res.*, 2017, p. 319–46.  
<https://doi.org/10.1016/bs.abr.2016.12.008>.
- [94] Wanat N., Austruy A., Joussein E., Soubrand M., Hitmi A., Gauthier-Moussard C., et al. Potentials of *Miscanthus* × *giganteus* grown on highly contaminated Technosols. *J Geochemical Explor* 2013;126–127:78–84.  
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.01.001>.
- [95] Barbosa B., Boléo S., Sidella S., Costa J., Duarte M.P., Mendes B., et al. Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Soils Using the Perennial Energy Crops *Miscanthus* spp. and *Arundo donax* L. *BioEnergy Res* 2015;8:1500–11. <https://doi.org/10.1007/s12155-015-9688-9>.
- [96] Bleam W. *Soil and Environmental Chemistry*. Madison, WI, United States: Elsevier; 2017. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-01022-X>.
- [97] Bleam W. *Element Abundance. Soil Environ. Chem.*, Elsevier; 2017, p. 1–38.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804178-9.00001-X>.
- [98] Wang R., Sun R., Liu G., Yousaf B., Wu D., Chen J., et al. A review of the biogeochemical controls on the occurrence and distribution of polycyclic aromatic compounds (PACs) in coals. *Earth-Science Rev* 2017;171:400–18.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.011>.
- [99] Turley D.B. *The Chemical Value of Biomass. Introd. to Chem. from Biomass*, John Wiley & Sons, Ltd; 2008, p. 21–46.  
<https://doi.org/10.1002/9780470697474.ch2>.
- [100] Рудишин С. В. *Основи біогеохімії*. Київ: Академія; 2013.
- [101] Dohleman F. G., Heaton E. A., Arundale R. A., Long S. P. Seasonal dynamics of above- and below-ground biomass and nitrogen partitioning in *Miscanthus* × *giganteus* and *Panicum virgatum* across three growing seasons. *GCB Bioenergy* 2012;4:534–44. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01153.x>.
- [102] Maslikova E. P. Phytointication spatio-temporal structures tehnozemov and

- endogenous mechanisms of sustainable functioning of anthropogenic soil-like bodies. *Agrology* 2018;1:273–80. <https://doi.org/10.32819/2617-6106.2018.13006>.
- [103] Maslikova K. P. Ecomorphic structure of the soil macrofauna communities of technosols of the Nikopol Manganese Ore Basin. *Biosyst Divers* 2018;26:85–91. <https://doi.org/10.15421/011813>.
- [104] Maslikova K. P. Cadmium distribution in soils of Dnipropetrovsk oblast and its accumulation in crop production. *Ukr J Ecol* 2018;8:910–7. <https://doi.org/10.15421/2018>.
- [105] Maslikova K. P. Управління функціональними властивостями моделей техноземів за допомогою первинної стратиграфії насипок. *Ukr J Ecol* 2018;8:619–27. [https://doi.org/10.15421/2018\\_257](https://doi.org/10.15421/2018_257).
- [106] Zhukov A. V., Maslikova K. P, Kovalenko D. V. Dynamics of the regulatory ecosystem service following the technogenic soil forming process in Nikopol manganese ore basin. *Nauk Dopovidi Nacional'nogo Unìversitetu Bioresursiv ì Prir Ukraïni* 2018;2018. <https://doi.org/10.31548/dopovidi2018.06.005>.
- [107] Maslikova K. P., Ladska I. V., Zhukov O. V. Водопроникність техноземів у моделях конструкції з різною стратиграфією. *Biol Bull Bogdan Chmelnitskiy Melitopol State Pedagog Univ* 2016;6:250–65. <https://doi.org/10.15421/201693>.
- [108] Maslikova K. P., Zhukov O. V. Біологічне різноманіття та екосистемні сервіси техноземів, створених на територіях видобутку корисних копалин. *Agrology* 2019;2:247–57. <https://doi.org/10.32819/019034>.
- [109] Hu X., Chen J., Zhu L. Soil aggregate size distribution and stability of farmland as affected by dry and wet sieving methods. *Zemdirbyste* 2020;107:179–84. <https://doi.org/10.13080/z-a.2020.107.023>.
- [110] Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion loss: A guide to conservation planning. *Agricultural Handbook No. 537* 1978.
- [111] Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage*

Paper 56. Rome: 1998.

- [112] Landsberg J.D., Miller R.E., Anderson H.W., Tepp J.S. Bulk density and soil resistance to penetration as affected by commercial thinning in northeastern Washington. Portland: 2003. <https://doi.org/10.2737/PNW-RP-551>.
- [113] Barrios E. Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecol Econ* 2007;64:269–85. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.03.004>.
- [114] Cresswell H.; Hume I.; Wang E.; Finlayson J.; Stewart J.; Ringrose-Voase A. Soil science in the management of multi-functional rural landscapes. *World* 2010:42–5.
- [115] Brussaard L., Pulleman M. M., Ouédraogo É., Mando A., Six J. Soil fauna and soil function in the fabric of the food web. *Pedobiologia (Jena)* 2007;50:447–62. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2006.10.007>.
- [116] Fan M. S., Zhao F. J., Fairweather-Tait S. J., Poulton P. R., Dunham S. J., McGrath S. P. Evidence of decreasing mineral density in wheat grain over the last 160 years. *J Trace Elem Med Biol* 2008;22:315–24. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2008.07.002>.
- [117] Zhang J., Zhu T., Meng T., Zhang Y., Yang J., Yang W., et al. Agricultural land use affects nitrate production and conservation in humid subtropical soils in China. *Soil Biol Biochem* 2013;62:107–14. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.03.006>.
- [118] Metwally M. S., Shaddad S. M., Liu M., Yao R. J., Abdo A.I., Li P., et al. Soil properties spatial variability and delineation of site-specific management zones based on soil fertility using fuzzy clustering in a hilly field in Jianyang, Sichuan, China. *Sustainability* 2019;11:7084. <https://doi.org/10.3390/su11247084>.
- [119] Rutebuka J., Kagabo D. M., Verdoodt A. Farmers' diagnosis of current soil erosion status and control within two contrasting agro-ecological zones of Rwanda. *Agric Ecosyst Environ* 2019;278:81–95. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.03.016>.
- [120] Martinez P., Souza I. F. Genesis of pseudo-sand structure in Oxisols from

- Brazil – A review. *Geoderma Reg* 2020;22.  
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00292>.
- [121] Milà i Canals L., Romanyà J., Cowell S. J. Method for assessing impacts on life support functions (LSF) related to the use of “fertile land” in Life Cycle Assessment (LCA). *J Clean Prod* 2007;15:1426–40.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.05.005>.
- [122] Booth M.S., Stark J.M., Rastetter E. Controls on nitrogen cycling in terrestrial ecosystems: A synthetic analysis of literature data. *Ecol Monogr* 2005;75:139–57. <https://doi.org/10.1890/04-0988>.
- [123] Blank L., Linker R., Carmel Y. A multiscale analysis of herbaceous species richness in a Mediterranean ecosystem. *J Plant Ecol* 2013;6:113–21.  
<https://doi.org/10.1093/jpe/rts022>.
- [124] Weissenberger S., Lucotte M., Houel S., Soumis N., Duchemin É., Canuel R. Modeling the carbon dynamics of the La Grande hydroelectric complex in northern Quebec. *Ecol Modell* 2010;221:610–20.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.10.037>.
- [125] Ni X., Groffman P. M. Declines in methane uptake in forest soils. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2018;115:8587–90. <https://doi.org/10.1073/pnas.1807377115>.
- [126] Filser J., Faber J. H., Tiunov A. V., Brussaard L., Frouz J., De Deyn G., et al. Soil fauna: Key to new carbon models. *Soil* 2016;2:565–82.  
<https://doi.org/10.5194/soil-2-565-2016>.
- [127] Tschakert P., Khouma M., Sène M. Biophysical potential for soil carbon sequestration in agricultural systems of the Old Peanut Basin of Senegal. *J Arid Environ* 2004;59:511–33. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.03.026>.
- [128] Ahas R., Aasa A. The effects of climate change on the phenology of selected Estonian plant, bird and fish populations. *Int J Biometeorol* 2006;51:17–26.  
<https://doi.org/10.1007/s00484-006-0041-z>.
- [129] Zhukov O. V., Bondarev D. L., Yermak Y. I., Fedushko M. P. Effects of temperature patterns on the spawning phenology and niche overlap of fish assemblages in the water bodies of the Dnipro River basin. *Ecol Montenegrina*



2019;22:177–203.

- [130] Nemergut D.R., Schmidt S.S.K., Fukami T., O'Neill S. P., Bilinski T. M., Stanish L. F., et al. Soil Type Is the Primary Determinant of the Composition of the Total and Active Bacterial Communities in Arable Soils. *Soil Biol Biochem* 2014;8:1–8. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.3.1800>.
- [131] Wilcox B. A., Murphy D. D., Portmann R. W., Solomon S., Hegerl G. C., Parmesan C, et al. A gridded historical (1985-1993) bioclimate dataset for the conterminous United States Proceedings of the 10th Conference on Applied Climatology. *Oikos* 1996;125:219–22. <https://doi.org/10.2307/2461453>.
- [132] Wigley T. L., Raper S.B. Interpretation of high projections for global-mean warming. *Science* (80- ) 2001;293:451–4. <https://doi.org/10.1126/science.1061604>.
- [133] El-Shehawy R., Gorokhova E., Fernández-Piñas F., del Campo F. F. Global warming and hepatotoxin production by cyanobacteria: What can we learn from experiments? *Water Res* 2012;46:1420–9. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.021>.
- [134] Daufresne M., Bady P., Fruget J.F. Impacts of global changes and extreme hydroclimatic events on macroinvertebrate community structures in the French Rhône River. *Oecologia* 2007;151:544–59. <https://doi.org/10.1007/s00442-006-0655-1>.
- [135] Cleland E.E., Collins S.L., Dickson T.L., Farrer E.C., Gross K.L., Gherardi L. A., et al. Sensitivity of grassland plant community composition to spatial vs. temporal variation in precipitation. *Ecology* 2013;94:1687–96. <https://doi.org/10.1890/12-1006.1>.
- [136] Legendre P., De Cáceres M., Borcard D. Community surveys through space and time: Testing the space-time interaction in the absence of replication. *Ecology* 2010;91:262–72. <https://doi.org/10.1890/09-0199.1>.
- [137] Lamarque J. F., Bond T. C., Eyring V., Granier C., Heil A., Klimont Z., et al. Historical (1850-2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: Methodology and application. *Atmos Chem*

- Phys 2010;10:7017–39. <https://doi.org/10.5194/acp-10-7017-2010>.
- [138] La Sorte F. A., Fink D., Blancher P. J., Rodewald A. D., Ruiz-Gutierrez V., Rosenberg K. V., et al. Global change and the distributional dynamics of migratory bird populations wintering in Central America. *Glob Chang Biol* 2017;23:5284–96. <https://doi.org/10.1111/gcb.13794>.
- [139] Hedges J. I., Eglinton G., Hatcher P.G., Kirchman D.L., Arnosti C., Derenne S., et al. The molecularly-uncharacterized component of nonliving organic matter in natural environments. *Org Geochem* 2000;31:945–58. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00096-6](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00096-6).
- [140] Cotrufo M.F., Wallenstein M.D., Boot C.M., Deneff K., Paul E.. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Glob Chang Biol* 2013;19:988–95. <https://doi.org/10.1111/gcb.12113>.
- [141] Knicker H. Soil organic N - An under-rated player for C sequestration in soils? *Soil Biol Biochem* 2011;43:1118–29. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.02.020>.
- [142] Jacquemin J., Drouet T., Delsinne T., Roisin Y., Leponce M. Soil properties only weakly affect subterranean ant distribution at small spatial scales. *Appl Soil Ecol* 2012;62:163–9. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.08.008>.
- [143] Kratz W. The bait-lamina test: General aspects, applications and perspectives. *Environ Sci Pollut Res* 1998;5:94–6. <https://doi.org/10.1007/BF02986394>.
- [144] Abou Najm M.R., Jabro J.D., Iversen W.M., Mohtar R.H., Evans R.G. New method for the characterization of three-dimensional preferential flow paths in the field. *Water Resour Res* 2010;46. <https://doi.org/10.1029/2009WR008594>.
- [145] Castro Lopes A. A., Sousa D. G., dos Reis F.B., Figueiredo C. C., Malaquias JV, Souza LM, et al. Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. *Geoderma Reg* 2018;12:72–82. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.01.003>.
- [146] Hobbie S. E., Schimel J. P., Trumbore S.E., Randerson J.R. Controls over

- carbon storage and turnover in high-latitude soils. *Glob Chang Biol* 2000;6:196–210. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.06021.x>.
- [147] Zhang Y., Zheng X., Ren X., Zhang J., Misselbrook T., Cardenas L., et al. Land-use type affects nitrate production and consumption pathways in subtropical acidic soils. *Geoderma* 2019;337:22–31. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.012>.
- [148] Fierer N., Strickland M.S., Liptzin D., Bradford M.A., Cleveland C.C. Global patterns in belowground communities. *Ecol Lett* 2009;12:1238–49. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01360.x>.
- [149] Breg Valjavec M., Zorn M., Čarni A. Bioindication of human-induced soil degradation in enclosed karst depressions (dolines) using Ellenberg indicator values (Classical Karst, Slovenia). *Sci Total Environ* 2018;640–641:117–26. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.294>.
- [150] Wick A.F., Stahl P.D., Ingram L. J. Aggregate-Associated Carbon and Nitrogen in Reclaimed Sandy Loam Soils. *Soil Sci Soc Am J* 2009;73:1852–60. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0011>.
- [151] Pouyat R. V., Yesilonis I. D., Dombos M., Szlavecz K., Setälä H., Cilliers S., et al. A global comparison of surface soil characteristics across five cities: A test of the urban ecosystem convergence hypothesis. *Soil Sci* 2015;180:136–45. <https://doi.org/10.1097/SS.000000000000125>.
- [152] Gaublomme E., Vos B. De., Cools N. inbo An indicator for Microbial Biodiversity in Forest Soils Authors : Nature 2006.
- [153] Peixoto D. S., Silva L de C. M. da, Melo L. B, Azevedo R. P., Araújo B. L., Carvalho T. S., et al. Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. *Sci Total Environ* 2020;745. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140887>.
- [154] Klotzbücher T., Kaiser K., Guggenberger G., Gatzek C., Kalbitz K. A new conceptual model for the fate of lignin in decomposing plant litter. *Ecology* 2011;92:1052–62. <https://doi.org/10.1890/10-1307.1>.
- [155] Todd-Brown K.O., Hopkins F.M., Kivlin S.N., Talbot J.M., Allison S.D. A

- framework for representing microbial decomposition in coupled climate models. *Biogeochemistry* 2012;109:19–33. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9635-6>.
- [156] Clayton H.G., Wick A.F., Daniels W. L. Microbial biomass in reclaimed soils following coal mining in Virginia. 26th Annu Meet Am Soc Min Reclam 11th Billings L Reclam Symp 2009 2009;1:225–34. <https://doi.org/10.21000/jasmr09010227>.
- [157] Faly L.I., Kolombar T. M., Prokopenko E. V., Pakhomov O. Y., Brygadyrenko V.V. Structure of litter macrofauna communities in poplar plantations in an urban ecosystem in Ukraine. *Biosyst Divers* 2017;25:29–38. <https://doi.org/10.15421/011705>.
- [158] D’Odorico P., Bhattachan A., Davis K. F., Ravi S., Runyan C.W. Global desertification: Drivers and feedbacks. *Adv Water Resour* 2013;51:326–44. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.01.013>.
- [159] Bai Y., Wu J., Pan Q., Huang J., Wang Q., Li F., et al. Positive linear relationship between productivity and diversity: Evidence from the Eurasian Steppe. *J Appl Ecol* 2007;44:1023–34. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01351.x>.
- [160] Drake B. G., González-Meler M. A., Long S.P. MORE EFFICIENT PLANTS: A Consequence of Rising Atmospheric CO<sub>2</sub>? *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol* 1997;48:609–39. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.48.1.609>.
- [161] Houghton R.A. Balancing the Global Carbon Budget. *Annu Rev Earth Planet Sci* 2007;35:313–47. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140057>.
- [162] Borrelli P., Panagos P., Wuepper D. Positive cascading effect of restoring forests. *Int Soil Water Conserv Res* 2020;8:102. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.12.002>.
- [163] Magill A. H., Aber J. D. Long-term effects of experimental nitrogen additions on foliar litter decay and humus formation in forest ecosystems. *Plant Soil* 1998;203:301–11. <https://doi.org/10.1023/A:1004367000041>.
- [164] Bronick C.J., Lal R. Soil structure and management: A review. *Geoderma*

- 2005;124:3–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>.
- [165] Nacke H., Thürmer A., Wollherr A., Will C., Hodac L., Herold N., et al. Pyrosequencing-based assessment of bacterial community structure along different management types in German forest and grassland soils. *PLoS One* 2011;6. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017000>.
- [166] Potratz D.J., Mourtzinis S., Gaska J., Lauer J., Arriaga F. J., Conley S. P. Effect of Strip-Till Timing, Fertilizer Placement, and Row Spacing on Soybean Seed Yield. *Crop Forage Turfgrass Manag* 2019;5:190040. <https://doi.org/10.2134/cftm2019.05.0040>.
- [167] Weng Q., Lu D., Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sens Environ* 2004;89:467–83. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>.
- [168] Wells P. V. Vegetation in Relation to Geological Substratum and Fire in the San Luis Obispo Quadrangle, California. *Ecol Monogr* 1962;32:79–103. <https://doi.org/10.2307/1942361>.
- [169] Meusburger K., Steel A., Panagos P., Montanarella L., Alewell C. Spatial and temporal variability of rainfall erosivity factor for Switzerland. *Hydrol Earth Syst Sci* 2012;16:167–77. <https://doi.org/10.5194/hess-16-167-2012>.
- [170] Stein A., Gerstner K., Kreft H. Environmental heterogeneity as a universal driver of species richness across taxa, biomes and spatial scales. *Ecol Lett* 2014;17:866–80. <https://doi.org/10.1111/ele.12277>.
- [171] Zymaroieva A., Zhukov O., Romanchuck L., Pinkin A. Spatiotemporal dynamics of cereals grains and grain legumes yield in Ukraine. *Bulg J Agric Sci* 2019;25:1107–13.
- [172] Zymaroieva A. Spatio-temporal patterns of maize yield variation within Ukraine. *Sci Horizons* 2019;2:58–66. <https://doi.org/doi:10.332491/2663-2144-2019-75-2-58-66>.
- [173] Zymaroieva A. Spatio-temporal patterns of maize yield variation within Ukraine. *Sci Horizons* n.d.;2:58–66. <https://doi.org/10.332491/2663-2144-2019-75-2-58-66>.

- [174] Zymarioieva A. A. Features of the spatiotemporal trend of grain and grain legumes yields in Forest and Forest-Steppe zone of Ukraine. *Bull Poltava State Agrar Acad* 2018;3:66–73. <https://doi.org/DOI.10.31210/visnyk2018.03.10>.
- [175] Kon Kam King J., Granjou C., Fournil J., Cecillon L. Soil sciences and the French 4 per 1000 Initiative—The promises of underground carbon. *Energy Res Soc Sci* 2018;45:144–52. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.06.024>.
- [176] C.R. P, B. S. Land-Use Land-Cover Change and Its Impact on Surface Runoff using Remote Sensing and GIS. *Int J Adv Remote Sens GIS* 2017;6:2103–13. <https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.237>.
- [177] Baer S. G., Blair J. M., Collins S. L., Knapp A. K. Plant community responses to resource availability and heterogeneity during restoration. *Oecologia* 2004;139:617–29. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1541-3>.
- [178] Shupranova L. V., Khlopova V. M., Kharytonov M. M. Air Pollution Assessment in the Dnepropetrovsk Industrial Megapolice of Ukraine. *NATO Sci. Peace Secur. Ser. C Environ. Secur.*, 2014, p. 101–4. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5577-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5577-2_17).
- [179] Kharytonov MM, Stankevich SA, Titarenko O V., Doležalová Weissmannová H, Klimkina II, Frolova LA. Geostatistical and geospatial assessment of soil pollution with heavy metals in Pavlograd city (Ukraine). *Ecol Quest* 2020;31:1. <https://doi.org/10.12775/EQ.2020.013>.
- [180] Maamar B., Nouar B., Soudani L., Maatoug M., Azzaoui M., Kharytonov M., et al. Biodiversity and dynamics of plant groups of Chebket El Melhassa region (Algeria). *Biosyst Divers* 2018;26:62–70. <https://doi.org/10.15421/011810>.
- [181] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* (80- ) 2004;304:1623–7. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>.
- [182] Demenois J., Torquebiau E., Arnoult M. H., Eglin T., Masse D., Assouma M. H., et al. Barriers and Strategies to Boost Soil Carbon Sequestration in

- Agriculture. Front Sustain Food Syst 2020;4.  
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00037>.
- [183] Foran T., Butler Jr.A., Williams L.J., Wanjura W.J., Hall A., Carter L., et al. Taking Complexity in Food Systems Seriously: An Interdisciplinary Analysis. *World Dev* 2014;61:85–101. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2014.03.023>.
- [184] Jerneck A., Olsson L. Food first! Theorising assets and actors in agroforestry: risk evaders, opportunity seekers and ‘the food imperative’ in sub-Saharan Africa. *Int J Agric Sustain* 2014;12:1–22. <https://doi.org/10.1080/14735903.2012.751714>.
- [185] Meinshausen M., Meinshausen N., Hare W., Raper Sc.B., Frieler K., Knutti R., et al. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 °C. *Nature* 2009;458:1158–62. <https://doi.org/10.1038/nature08017>.
- [186] Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoit M., Butault J-P., et al. Identifying cost-competitive greenhouse gas mitigation potential of French agriculture. *Environ Sci Policy* 2017;77:130–9. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.08.003>.
- [187] Rumpel C., Amiraslani F., Chenu C., Garcia Cardenas M., Kaonga M., Koutika L. S., et al. The 4p1000 initiative: Opportunities, limitations and challenges for implementing soil organic carbon sequestration as a sustainable development strategy. *Ambio* 2020;49:350–60. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01165-2>.
- [188] Zymaroieva A., Zhukov O. Analyzing cereal and grain legumes (pulses) yields patterns in the forest and forest-steppe zones of Ukraine using geographically weighted principal components analysis. *Acta Agric Slov* 2020;116:287. <https://doi.org/10.14720/aas.2020.116.2.873>.
- [189] Zymaroieva A., Zhukov O., Fedoniuk T., Pinkina T., Hurelia V. The Relationship Between Landscape Diversity and Crops Productivity: Landscape Scale Study. *J Landsc Ecol* 2021;14:39–58. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2021-0003>.
- [190] Wallace A., Wallace G. A., Cha J. W. Soil organic matter and the global

- carbon cycle. *J Plant Nutr* 1990;13:459–66.  
<https://doi.org/10.1080/01904169009364091>.
- [191] Chan Y. Increasing soil organic carbon of agricultural land. *Carbon N Y* 2008.
- [192] Arriaga F. J., Lowery B. Spatial distribution of carbon over an eroded landscape in southwest Wisconsin. *Soil Tillage Res* 2005;81:155–62.  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2004.09.004>.
- [193] Forbes M. S., Raison R. J., Skjemstad J. O. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems. *Sci Total Environ* 2006;370:190–206.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.06.007>.
- [194] Jänsch S., Römcke J., Didden W. The use of enchytraeids in ecological soil classification and assessment concepts. *Ecotoxicol Environ Saf* 2005;62:266–77. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2004.10.025>.
- [195] Ritz K., Young I. M. Interactions between soil structure and fungi. *Mycologist* 2004;18:52–9. <https://doi.org/10.1017/S0269915X04002010>.
- [196] Lal R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustain* 2015;7. <https://doi.org/10.3390/su7055875>.
- [197] Tilman D., Lehman C. L., Thomson KT. Plant diversity and ecosystem productivity: Theoretical considerations. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1997;94:1857–61. <https://doi.org/10.1073/pnas.94.5.1857>.
- [198] Giller P.S., O'Donovan G. Biodiversity and ecosystem function: Do species matter? *Biol Environ* 2002;102:129–39.  
<https://doi.org/10.3318/BIOE.2002.102.3.129>.
- [199] Miltner A., Bombach P., Schmidt-Brücken B., Kästner M. SOM genesis: Microbial biomass as a significant source. *Biogeochemistry* 2012;111:41–55.  
<https://doi.org/10.1007/s10533-011-9658-z>.
- [200] Tiemann L. K., Grandy A. S., Atkinson E. E., Marin-Spiotta E., McDaniel MD. Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. *Ecol Lett* 2015;18:761–71.  
<https://doi.org/10.1111/ele.12453>.



- [201] Amaducci S., Facciotto G., Bergante S., Perego A., Serra P., Ferrarini A., et al. Biomass production and energy balance of herbaceous and woody crops on marginal soils in the Po Valley. *GCB Bioenergy* 2017;9:31–45. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12341>.
- [202] West N. M., Matlaga D. P., Muthukrishnan R., Spyreas G., Jordan N. R., Forester J. D., et al. Lack of impacts during early establishment highlights a short-term management window for minimizing invasions from perennial biomass crops. *Front Plant Sci* 2017;8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00767>.
- [203] Production P. Department of Agrobiologia and Forestry CIHEAM - Options Mediterraneennes. Options n.d.
- [204] Wick A. F., Daniels W. L., Nash W. L., Burger J. A. Aggregate Recovery in Reclaimed Coal Mine Soils of SW Virginia. *L Degrad Dev* 2016;27:965–72. <https://doi.org/10.1002/ldr.2309>.
- [205] Regelink I. C., Stoof C. R., Rousseva S., Weng L., Lair G. J., Kram P., et al. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties. *Geoderma* 2015;247–248:24–37. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.01.022>.
- [206] Lindstrom M. J. Effects of residue harvesting on water runoff, soil erosion and nutrient loss. *Agric Ecosyst Environ* 1986;16:103–12. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(86\)90097-6](https://doi.org/10.1016/0167-8809(86)90097-6).
- [207] Paustian K., Larson E., Kent J., Marx E., Swan A. Soil C Sequestration as a Biological Negative Emission Strategy. *Front Clim* 2019;1. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00008>.
- [208] Wang X., He C., Liu B., Zhao X., Liu Y., Wang Q., et al. Effects of Residue Returning on Soil Organic Carbon Storage and Sequestration Rate in China's Croplands: A Meta-Analysis. *Agronomy* 2020;10:691. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050691>.
- [209] Paustian K., Lehmann J., Ogle S., Reay D., Robertson G. P., Smith P. Climate-smart soils. *Nature* 2016;532:49–57.

- <https://doi.org/10.1038/nature17174>.
- [210] Lal R. Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture. *J Soil Water Conserv* 2015;70:55A-62A. <https://doi.org/10.2489/jswc.70.3.55A>.
- [211] Lal R. Crop residues as soil amendments and feedstock for bioethanol production. *Waste Manag* 2008;28:747–58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.023>.
- [212] Borrelli P., Robinson D. A., Panagos P., Lugato E., Yang J. E., Alewell C., et al. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proc Natl Acad Sci* 2020;117:21994–2001. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117>.
- [213] Foley J. A., Ramankutty N., Brauman K. A., Cassidy E. S., Gerber J.S., Johnston M, et al. Solutions for a cultivated planet. *Nature* 2011;478:337–42. <https://doi.org/10.1038/nature10452>.
- [214] Montanarella L. Agricultural policy: Govern our soils. *Nature* 2015;528:32–3. <https://doi.org/10.1038/528032a>.
- [215] Ito A. Simulated impacts of climate and land-cover change on soil erosion and implication for the carbon cycle, 1901 to 2100. *Geophys Res Lett* 2007;34. <https://doi.org/10.1029/2007GL029342>.
- [216] Baveye P. C., Schnee L. S., Boivin P., Laba M., Radulovich R. Soil Organic Matter Research and Climate Change: Merely Re-storing Carbon Versus Restoring Soil Functions. *Front Environ Sci* 2020;8. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.579904>.
- [217] Navarro-Pedreño J., Almendro-Candel M. B., Zorpas A. A. The Increase of Soil Organic Matter Reduces Global Warming, Myth or Reality? *Sci* 2021;3:18. <https://doi.org/10.3390/sci3010018>.
- [218] Al-Kaisi M. M., Yin X. Tillage and Crop Residue Effects on Soil Carbon and Carbon Dioxide Emission in Corn-Soybean Rotations. *J Environ Qual* 2005;34:437–45. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0437>.
- [219] Barsotti J. L., Sainju U. M., Lenssen A.W., Montagne C., Hatfield P.G. Crop

- yields and soil organic matter responses to sheep grazing in US northern Great Plains. *Soil Tillage Res* 2013;134:133–41. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.07.015>.
- [220] Jin V.L., Baker J.M., Johnson J.M.F., Karlen D.L., Lehman R.M., Osborne S.L., et al. Soil Greenhouse Gas Emissions in Response to Corn Stover Removal and Tillage Management Across the US Corn Belt. *BioEnergy Res* 2014;7:517–27. <https://doi.org/10.1007/s12155-014-9421-0>.
- [221] Di Vita G., Pilato M., Pecorino B., Brun F., D’Amico M.. A Review of the Role of Vegetal Ecosystems in CO<sub>2</sub> Capture. *Sustainability* 2017;9:1840. <https://doi.org/10.3390/su9101840>.
- [222] Ray R.L., Griffin R.W., Fares A., Elhassan A., Awal R., Woldeesenbet S., et al. Soil CO<sub>2</sub> emission in response to organic amendments, temperature, and rainfall. *Sci Rep* 2020;10:5849. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62267-6>.
- [223] Bilandžija D., Zgorelec Ž., Kisić I. Influence of Tillage Practices and Crop Type on Soil CO<sub>2</sub> Emissions. *Sustainability* 2016;8:90. <https://doi.org/10.3390/su8010090>.
- [224] Olson K.R. Soil organic carbon sequestration, storage, retention and loss in U.S. croplands: Issues paper for protocol development. *Geoderma* 2013;195–196:201–6. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.12.004>.
- [225] Thompson M., Gamage D., Hirotsu N., Martin A., Seneweera S. Effects of Elevated Carbon Dioxide on Photosynthesis and Carbon Partitioning: A Perspective on Root Sugar Sensing and Hormonal Crosstalk. *Front Physiol* 2017;8. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00578>.
- [226] Kimball B.A., Idso S.B. Increasing atmospheric CO<sub>2</sub>: effects on crop yield, water use and climate. *Agric Water Manag* 1983;7:55–72. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(83\)90075-6](https://doi.org/10.1016/0378-3774(83)90075-6).
- [227] Yamori W., Hikosaka K., Way D. A. Temperature response of photosynthesis in C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, and CAM plants: temperature acclimation and temperature adaptation. *Photosynth Res* 2014;119:101–17. <https://doi.org/10.1007/s11120-013-9874-6>.

- [228] Gerbaud A., André M. Effect of CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, and Light on Photosynthesis and Photorespiration in Wheat. *Plant Physiol* 1980;66:1032–6. <https://doi.org/10.1104/pp.66.6.1032>.
- [229] Mortensen L. M., Ulsaker R. Effect of CO<sub>2</sub> concentration and light levels on growth, flowering and photosynthesis of *Begonia × hiemalis* Fotsch. *Sci Hortic (Amsterdam)* 1985;27:133–41. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(85\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0304-4238(85)90063-9).
- [230] Idso S. B., Idso K. E. Effects of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on plant constituents related to animal and human health. *Environ Exp Bot* 2001;45:179–99. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(00\)00091-5](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(00)00091-5).
- [231] Emery S.M., Reid M. L, Bell-Dereske L., Gross K.L. Soil mycorrhizal and nematode diversity vary in response to bioenergy crop identity and fertilization. *GCB Bioenergy* 2017;9:1644–56. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12460>.
- [232] Бомба М. Я. Землеробство з основами ґрунтознавства, агрохімії та агроєкології. Київ: Урожай; 2003.
- [233] Маринич А. М., Пашенко В. М., Шищенко П. Г. Природа Украинской ССР. Ландшафты и физико-географическое районирование. Київ: Наукова думка; 1985.
- [234] Диченко О. Ю. Екологічні закономірності динаміки популяцій шкідників бур'яків цукрових у центральному лісостепу України : дис. канд. с.–г. наук : 03.00.16. Полтава: 2015.
- [235] Папка О.С. Ієрархічний аналіз ефективності систем обробітку ґрунту як агротехнологічного методу знищення бур'янів та ваточника сирійського (*Asclepias syriaca* L.). Вісник Полтавської Державної Аграрної Академії 2016:98–106. <https://doi.org/10.31210/visnyk2016.1-2.20>.
- [236] Булава Л. М. Географічний атлас: Полтавська область. Моя мала Батьківщина. Київ: Мапа; 2004.
- [237] Диченко О. Ю, Писаренко П. В., Кунах О. М., Жуков О. В. Просторова агроєкологія як основа прогнозу чисельності шкідників.

Дніпропетровськ: ДНУ; 2015. <https://doi.org/DOI:10.13140/RG.2.1.1014.4485>.

- [238] Пономаренко С. В. Динаміка урожайності сільськогосподарських культур та агроекологічне зонування території Полтавської області. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата сільськогосподарських наук за спеціальністю. Полтава: Полтавська державна аграрна академія Міністерства освіти і науки України; 2018.
- [239] Писаренко П. В. Сучасний стан родючості ґрунтів полтавської області 2012.
- [240] Писаренко П. В., Диченко ОЮ. Одночасність (синхронність) зміни динаміки шкідників буряків цукрових у Центральному Лісостепу України. Вісник Полтавської Державної Аграрної Академії 2014;3:33–35.
- [241] ДСТУ ГОСТ 17.4.3.01:2019 . «Охорона довкілля. Якість ґрунту. Загальні вимоги до відбирання проб (ГОСТ 17.4.3.01-2017, IDT)» 2019.
- [242] 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, IDT)» 2019.
- [243] Baldock J. A. Composition and Cycling of Organic Carbon in Soil. *Nutr. Cycl. Terr. Ecosyst.*, 2007, p. 1–35. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-68027-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-540-68027-7_1).
- [244] Neubert M. G., Caswell H. Alternatives to resilience for measuring the responses of ecological systems to perturbations. *Ecology* 1997;78:653–65. [https://doi.org/https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1997\)078\[0653:ATRFMT\]2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1890/0012-9658(1997)078[0653:ATRFMT]2.0.CO;2).

## ДОДАТОК 1

Таблиця Д.1. Середня температура повітря протягом років дослідження, 2016–2020 рр.

Місяць	Декада	Температура, °С				
		2016	2017	2018	2019	2020
Січень	1	–9,7	–4,9	1,0	–5,2	–1,1
	2	–2,7	–5,4	–4,6	–4,5	–0,1
	3	–5,8	–7	–6,0	–5,8	0,8
<i>Середнє за місяць</i>		–6,1	–5,8	–3,2	–5,2	–0,1
Лютий	1	–0,1	–7,1	–1,3	–0,4	–2,2
	2	1,5	–2,6	–2,6	–0,1	1,7
	3	3	3	–10,0	–2,1	2,9
<i>Середнє за місяць</i>		1,5	–2,2	–4,6	–0,9	0,8
Березень	1	6,3	6,1	–4,8	3,4	9,2
	2	2,9	4,3	–2,7	3,8	6,0
	3	3,9	7,6	–0,9	4,7	5,3
<i>Середнє за місяць</i>		4,4	6,0	–2,8	4,0	6,8
Квітень	1	13	12,6	9,6	9,6	8,2
	2	15,1	8,8	12,9	8,8	7,9
	3	13,2	13,1	14,7	14,0	11,1
<i>Середнє за місяць</i>		13,8	11,5	12,4	10,8	9,1
Травень	1	15,9	17,2	21,9	13,8	14,4
	2	15,4	12,8	15,9	18,4	13,4
	3	19,3	19,5	18,7	20,2	12,8
<i>Середнє за місяць</i>		16,9	16,5	18,8	17,5	13,5
Червень	1	17,4	20,7	17,7	22,3	18,8
	2	21,3	20,8	22,3	24,4	23,8
	3	25,8	24,1	21,5	22,4	23,4
<i>Середнє за місяць</i>		21,5	21,9	20,5	23,0	22,0
Липень	1	22,2	21,3	20,6	20,3	23,9
	2	26,1	21,9	22,1	19,2	20,5
	3	23,9	24,3	23,6	22,1	22,7
<i>Середнє за місяць</i>		24,1	22,5	22,1	20,5	22,4

Місяць	Декада	Температура, °С				
		2016	2017	2018	2019	2020
Серпень	1	25	27,3	23,0	18,8	22,0
	2	20,7	27,3	23,3	21,9	20,6
	3	22,8	19,9	22,4	22,5	21,5
<i>Середнє за місяць</i>		22,8	24,8	22,9	21,1	21,4
Вересень	1	21,1	17,6	21,5	20,5	22,2
	2	16,4	21,4	18,4	16,0	17,0
	3	12,1	15,3	12,7	11,6	16,7
<i>Середнє за місяць</i>		16,5	18,1	17,5	16,0	18,6
Жовтень	1	13,5	10,7	10,9	10,3	15,2
	2	4,3	11,9	14,0	14,4	12,6
	3	3,4	5,9	8,7	7,8	6,3
<i>Середнє за місяць</i>		7,1	9,5	11,2	10,8	11,4
Листопад	1	5,4	5,9	4,4	8,4	7,8
	2	1,3	4,1	-1,5	4,2	-4,6
	3	-2	0,1	-4,2	-1,6	1,3
<i>Середнє за місяць</i>		1,6	3,4	-0,4	3,7	1,5
Грудень	1	-2,9	3,8	-2,5	0,2	0,5
	2	-3,2	3,9	-2,9	2,7	-2,6
	3	-1,6	3	-2,9	3,2	-1,8
<i>Середнє за місяць</i>		-2,6	3,6	-2,8	2,0	-1,3
<i>Середнє за рік</i>		10,1	10,8	9,3	10,3	10,5

Таблиця Д.2. Кількість опадів протягом років дослідження, 2016–2020 рр.

Місяць	Декада	Опади, мм				
		2016	2017	2018	2019	2020
Січень	1	41,1	45,5	8,1	7,6	6,2
	2	54,7	2,1	8,0	15,4	3,4
	3	106,4	0,4	14,2	30,6	11,0
<i>Сума за місяць</i>		67,4	202,2	48,0	30,3	53,6
Лютий	1	10,9	14,0	25,0	3,3	17,9
	2	14,5	0,0	5,5	14,6	15,6
	3	11,3	8,7	6,4	0,7	24,0
<i>Сума за місяць</i>		12,2	36,7	22,7	36,9	18,6
Березень	1	17,1	0,0	41,5	7,5	3,2
	2	2,8	8,6	47,2	8,9	10,7
	3	39,9	1,3	15,5	7,4	6,9
<i>Сума за місяць</i>		19,9	59,8	9,9	104,2	23,8
Квітень	1	9,9	2,6	12,6	0,0	0,0
	2	8,9	4,6	4,6	21,5	9,7
	3	17,1	8,7	10,1	11,6	15,6
<i>Сума за місяць</i>		12,0	35,9	15,9	27,3	33,1
Травень	1	16,5	0,0	0,0	34,3	47,0
	2	26,9	28,0	46,6	2,4	19,6
	3	46,1	2,6	0,0	27,1	43,5
<i>Сума за місяць</i>		29,8	89,5	30,6	46,6	63,8
Червень	1	0,0	1,3	1,8	33,1	49,8
	2	53,7	1,1	13,9	2,4	15,6
	3	5,4	12,3	53,7	3,1	2,3
<i>Сума за місяць</i>		19,7	59,1	14,7	69,4	38,6
Липень	1	8,9	6,7	0,6	24,9	13,6
	2	16,5	39,5	19,4	3,5	20,9
	3	12,1	46,0	78,8	14,4	5,0
<i>Сума за місяць</i>		12,5	37,5	92,2	98,8	42,8
Серпень	1	1,7	0,0	0,0	1,7	-
	2	22,5	0,0	0,4	1,1	7,0



Місяць	Декада	Опади, мм				
		2016	2017	2018	2019	2020
	3	41,4	3,7	1,0	0,0	8,9
<i>Сума за місяць</i>		21,9	65,6	3,7	1,4	2,8
Вересень	1	0,0	26,5	49,1	5,3	1,8
	2	0,0	0,0	4,3	1,8	-
	3	6,3	9,6	29,1	14,5	19,2
<i>Сума за місяць</i>		2,1	6,3	36,1	82,5	21,6
Жовтень	1	51,0	12,9	7,4	41,4	2,6
	2	24,2	13,5	0,0	0,0	22,5
	3	8,0	24,1	11,0	1,4	18,6
<i>Сума за місяць</i>		27,7	83,2	50,5	18,4	42,8
Листопад	1	53,9	17,3	0,3	8,6	5,9
	2	13,6	9,5	6,1	1,4	4,6
	3	13,3	3,0	17,2	22,8	17,8
<i>Сума за місяць</i>		26,9	80,8	29,8	23,6	32,8
Грудень	1	29,6	30,2	28,7	10,9	48,8
	2	9,1	39,0	13,4	7,4	12,6
	3	3,6	10,2	39,2	10,3	13,8
<i>Сума за місяць</i>		14,1	42,3	79,4	81,3	28,6
<i>Сума за рік</i>		798.9	433.5	620.7	402.9	525.6

## ДОДАТОК 2

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

*Публікації у наукових фахових виданнях України*

3. Kulyk, M., **Galytska, M.**, Samoylik, M., & Zhornyk, I. (2019). Phytoremediation aspects of energy crops use in Ukraine. Agrolology, 2(1), 65–73. <https://doi.org/10.32819/2617-6106.2018.14020> (Проведенні польових досліджень, обчислення результатів, формування висновків, підготовки матеріалу до друку)
4. Колеснікова Л. А., **Галицька М. А.**, Піщаленко М. А., Бараболя О. В., Чубук Д. І., & Литвишко О. А. (2019). Реакція сільськогосподарських рослин на забруднення ґрунту нафтою. Вісник Полтавської державної аграрної академії, (4), 100-107. <https://doi.org/10.31210/visnyk2019.04.12> (Проведенні

*польових досліджень, обчислення результатів, формування висновків, підготовки матеріалу до друку)*

5. **Галицька, М. А.** Гуміфікаційно-мінералізаційні процеси як показник акумуляції карбону в ґрунтах [Текст] / **М. А. Галицька**, П. В. Писаренко, М. А. Кулик // Таврійський науковий вісник : Сільськогосподарські науки. - Херсон : Вид. дім "Гельветика", 2018. - Вип.102. - С. 130-136 36 (*Опрацювання та аналіз наукової літератури, підготовка до друку*)

6. Taranenko, A. O., Kulyk, M. I., **Galytska, M. A.** & Taranenko, S. V (2020). Influence of different methods of switch-grass cultivation on soil organic matter dynamics and biomass productivity. Bulletin of Poltava State Agrarian Academy, (3), 135–149. doi: 10.31210/visnyk2020.03.15 (*Проведенні польових досліджень, обчислення результатів, формування висновків, підготовки 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](http://dspace.pdaa.edu.ua:8080/bitstream/123456789/8787/1/Plant%20energy%20resources%20Monograf.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 / Оптимальні 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 “Астроя”, 2019. 150 с. с 13-36 (*Опрацювання та аналіз наукової літератури, підготовка до друку*).

9. **М.А. Галицька, М.І. Кулик, О.О. Горб** 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. – П. : ТОВ НВП «Укрпромторгсервіс», 2017. – 326 с.С 216-226 (*Опрацювання та аналіз наукової літератури, підготовка до друку*).

10. **М.А. Галицька, І.І. Жорник, А.В. Молчанова,** 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. Яснооб. – П. : ТОВ НВП «Укрпром торгсервіс», 2017. – 326 с.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 / Кол. авторів; за заг. ред. П. М. Макаренка, О. В. Калініченка, В. І. Аранчій. Полтава : ПП “Астрія”, 2019. 603 с. 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 № и 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 № у 2018 06231; заявл. 04.06.2018; дата публікації 10.12.2018, Бюл.№ 23

14. М. І. Кулик, І. І. Рожко, **М. А. Галицька**, Патент на корисну модель №125096 «Спосіб допосівної обробки насіння проса прутоподібного (*Panicum virgatum* L.)», винахідники власник: Полтавська державна аграрна академія. Від 25.04.2018

15. М. І. Кулик, **М. А. Галицька**, І. І. Рожко Авторський твір №76724 «Ботаніко-біологічні особливості та потенціал урожайності енергетичних культур», автори: , обсяг 20 с 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. – P. 49

17. **Галицька М.А.**, Лесшен Я. П. Оцінка життєвого циклу органічного вуглецю та азоту ґрунту при вирощуванні енергетичних культур // Матеріали II міжнародної науково-практичної інтернет - конференції "Ефективне функціонування екологічно-стабільних територій у контексті стратегії стійкого розвитку: агроекологічний, соціальний та економічний аспекти" – 28 листопада 2018, Полтава – 255 с., С. 52-55

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/ редкол.: В.А. Аранчій, П.В. Писаренко, С.В. Поспелов, О.В.Міщенко, М.М.Опара, В.М.Самородов.- Полтава: ПДАА, 2019.- 147 с.С 80-84

19. **Галицька М.А.,** Калініченко А. В. Зменшення викидів CO<sub>2</sub> шляхом системного застосування технології No-till в сільгоспвиробництві // Матеріали II міжнародної науково-практичної інтернет - конференції "Ефективне функціонування екологічно-стабільних територій у контексті стратегії стійкого розвитку: агроекологічний, соціальний та економічний аспекти" – 28 листопада 2018, Полтава – 255 с., С. 204-207.

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//Матеріали III міжнародної науково-практичної інтернет - конференції "Ефективне функціонування екологічно-стабільних територій у контексті стратегії стійкого розвитку: агроекологічний, соціальний та економічний аспекти" – 12 грудня 2019 року, Полтава – 255 с. С. 112-116

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'язберезувальної 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. 477 с. с. 162-165

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. 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/>

23. **Галицька М.А., Кулик М.І., Колеснікова Л.А** Інтенсивність асиміляції карбону при вирощуванні енергетичних культур в умовах Лісостепу України// Збірник матеріалів II Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічні проблеми навколишнього середовища та раціонального природокористування в контексті сталого розвитку» – 26 червня 2020, Полтава – 190с. С-127-131.