

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут нафтогазової інженерії
Кафедра Технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці

Доцяк Михайло Михайлович

УДК 631.416.2:631.95:628.477
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Оцінка ефективності застосування біовугілля (biochar) для
відновлення деградованих ґрунтів
(назва роботи)

Технології захисту навколишнього середовища
(назва освітньої програми)

183 Технології захисту навколишнього середовища
(шифр і назва спеціальності)

Здобувач освітнього ступеня М.М. Доцяк
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Грицуляк Г.М. д. с.-г. н., доцент
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

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

Івано-Франківськ-2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут нафтогазової інженерії

Кафедра технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці

ОПП Технології захисту навколишнього середовища

Затверджую
Зав. кафедри ТЗБП
Галина ГРИЦУЛЯК _____
(ім'я та прізвище) (підпис)
«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Доцяк Михайло Михайлович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Оцінка ефективності застосування біовугілля (biochar) для відновлення деградованих ґрунтів».

керівник роботи: Грицуляк Г.М. д. с.-г. н., доцент
(ім'я, прізвище, науковий ступінь, вчене звання керівника)

затверджені наказом університету від «15» 10 2025р. № №636/7 —

2 Термін здачі закінченої роботи «12» 12 2025 р.

3 Вихідні дані до роботи:

Картографічні та геологічні матеріали:

- Масштаби 1:10 000, 1:25 000 або 1:50 000.
- Використання: визначення рельєфу, схилів, густоти гідрографічної мережі,
- Оцінка ерозійної небезпеки, планування експериментальних ділянок,
- Карти геоморфологічних рівнів

Екологічні дані:

- Дані про поточний стан ґрунтів, поверхневих та підземних вод.
- Звіти про біорізноманіття та екосистеми в зоні впливу.

Технічна інформація:

- Перелік технічного обладнання та методів, що використовуються під час розробки.

Нормативно-правові документи:

- Закон України «Про охорону земель» (регламентує основні принципи охорони ґрунтів, відновлення деградованих земель).

- Земельний кодекс України (класифікація земель, правовий статус деградованих і малопродуктивних земель).
- Закон України «Про державний контроль за використанням та охороною земель» (умови і критерії контролю якості ґрунтів).
- акони природоохоронного профілю
- Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища».
- Закон України «Про відходи» (чинний до повної імплементації Закону «Про управління відходами»).
- Закон України «Про управління відходами» (2022) (важливо при використанні побічної біомаси для виробництва біовугілля).
- Закони щодо оцінки впливу на довкілля
- Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» (ОВД) (потрібний у разі масштабного внесення біовугілля на деградовані землі).

Календарний план виконання магістерської роботи

№	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання	Примітка
1	Вступ Розділ 1 Теоретичні основи застосування біовугілля	до 01.10.25	
2	Розділ 2. Характеристика деградованих ґрунтів досліджуваної території	до 20.10.25	
4	Розділ 3. Експериментальна частина	до 01.12.25	
5	Розділ 4. Охорона праці	до 08.12.25	
6	Висновки Літературні джерела Додатки	до 10.12.25	

Студент _____ Михайло ДОЦЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____ д. с.-г. н., доцент Галина ГРИЦУЛЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

Проблема деградації ґрунтів є однією з ключових екологічних загроз сучасності, оскільки ґрунтовий покрив забезпечує функціонування наземних екосистем, продуктивність агроландшафтів та стабільність біогеохімічних циклів. У світі понад третина ґрунтів перебуває у різних стадіях деградації через ерозійні процеси, забруднення, надмірну експлуатацію, урбанізацію та зміни гідрологічного режиму. В Україні деградація ґрунтів посилюється інтенсивним сільськогосподарським використанням, техногенним навантаженням, наслідками воєнних дій, зниженням вмісту гумусу, підвищенням кислотності та накопиченням токсикантів, що призводить до втрати родючості й погіршення екосистемних послуг. Сучасні виклики відновлення ґрунтів ускладнюються впливом кліматичних змін: зростання температур, збільшення частоти посух, інтенсифікації ерозійних процесів та загального зменшення вологості ґрунтового профілю. До цього додається техногенне забруднення важкими металами, нафтопродуктами, пестицидами, мікро- та наночастинками, руйнування структури ґрунту будівельною та промисловою діяльністю, а також деградація, спричинена вибуховими навантаженнями під час воєнних дій. Виснаження земель через інтенсивне землеробство, монокультури та недостатнє повернення органічної речовини ще більше погіршує стан ґрунтового покриву та зменшує його екологічну стійкість.

У цих умовах одним із найбільш перспективних методів відновлення є застосування біовугілля (biochar) — продукту термічного розкладання біомаси без доступу кисню, який поєднує агротехнологічні та кліматичні переваги. Біовугілля здатне підвищувати вміст стабільного органічного вуглецю в ґрунті, покращувати його структуру, водоутримувальну здатність і пористість, буферувати кислотність, підвищувати доступність поживних речовин та створювати оптимальне середовище для розвитку корисної мікробіоти. Воно

також ефективно сорбує важкі метали, пестициди й інші токсиканти, зменшуючи їхню рухомість і біодоступність. Завдяки цим властивостям біовугілля розглядається як універсальний інструмент екологічної реабілітації, здатний сприяти фіторемедіаційним процесам, адаптації агроєкосистем до змін клімату та довготривалому акумулюванню вуглецю в ґрунтових системах.

Метою дослідження є оцінка ефективності застосування біовугілля для відновлення фізико-хімічних, біологічних та екотоксикологічних характеристик деградованих ґрунтів. Для досягнення цієї мети передбачено аналіз сучасних наукових підходів до використання біовугілля, характеристику його властивостей, дослідження змін у ґрунтових показниках після внесення biochar, оцінку впливу на мобільність токсичних елементів, визначення потенціалу у фіторемедіаційних технологіях та розроблення рекомендацій щодо практичного застосування.

Об'єктом дослідження виступають деградовані ґрунти різного генезису та рівня техногенного впливу, а *предметом* — зміна їхніх властивостей під впливом внесення біовугілля.

Наукова новизна роботи полягає у комплексній оцінці впливу біовугілля на деградовані ґрунти в умовах техногенного та кліматичного навантаження, уточненні механізмів взаємодії biochar із мікробіотою та токсичними елементами, а також у визначенні оптимальних доз і способів внесення залежно від типу деградації ґрунтів.

Практичне значення результатів полягає у можливості їх використання для розробки проектів рекультивації порушених земель у промислових регіонах, екологічної модернізації агровиробництва, відновлення ґрунтів, забруднених важкими металами й органічними токсикантами, а також у системах підвищення родючості та водоутримувальної здатності ґрунтів. *Отримані результати* можуть слугувати основою для створення рекомендацій щодо сталого управління земельними ресурсами й адаптації до

кліматичних змін завдяки поглинанню та довготривалому зберіганню вуглецю у ґрунтовому середовищі.

Ключові слова: біовугілля, деградовані ґрунти, рекультивация, відновлення родючості, біоремедіация, фіторемедіация, агроекологія, сорбція забруднювачів, важкі метали, кислотно-лужний баланс, індекс деградації ґрунтів, показники родючості, екосистемні послуги.

ABSTRACT

The problem of soil degradation is one of the key ecological threats of modern times, since the soil cover ensures the functioning of terrestrial ecosystems, the productivity of agrolandscapes, and the stability of biogeochemical cycles. In the world, more than a third of soils are in various stages of degradation due to erosion processes, pollution, over-exploitation, urbanization and changes in the hydrological regime. In Ukraine, soil degradation is aggravated by intensive agricultural use, man-made loads, the consequences of military actions, a decrease in the content of humus, an increase in acidity and the accumulation of toxicants, which leads to a loss of fertility and a deterioration of ecosystem services. The modern challenges of soil restoration are complicated by the influence of climate change: rising temperatures, increased frequency of droughts, intensification of erosion processes, and a general decrease in the moisture content of the soil profile. Added to this is man-made pollution with heavy metals, oil products, pesticides, micro- and nano-particles, destruction of the soil structure by construction and industrial activities, as well as degradation caused by explosive loads during military operations. Depletion of lands due to intensive farming, monocultures and insufficient return of organic matter further worsens the condition of the soil cover and reduces its ecological sustainability.

In these conditions, one of the most promising recovery methods is the use of biochar, a product of thermal decomposition of biomass without access to oxygen, which combines agrotechnological and climatic advantages. Biochar can increase the content of stable organic carbon in the soil, improve its structure, water-holding capacity and porosity, buffer acidity, increase the availability of nutrients and create an optimal environment for the development of beneficial microbiota. It also effectively absorbs heavy metals, pesticides and other toxicants, reducing their mobility and bioavailability. Due to these properties, biochar is considered as a universal tool of ecological rehabilitation, able to promote phytoremediation

processes, adaptation of agro-ecosystems to climate changes and long-term accumulation of carbon in soil systems.

The purpose of the study is to evaluate the effectiveness of using biochar to restore the physicochemical, biological, and ecotoxicological characteristics of degraded soils. To achieve this goal, the analysis of modern scientific approaches to the use of biochar, the characterization of its properties, the study of changes in soil indicators after the introduction of biochar, the assessment of the impact on the mobility of toxic elements, the determination of the potential in phytoremediation technologies and the development of recommendations for practical application are provided.

The object of the research is degraded soils of different genesis and level of technogenic influence, and the subject is the change in their properties under the influence of biochar application.

The scientific novelty of the work consists in a comprehensive assessment of the impact of biochar on degraded soils in conditions of technogenic and climatic stress, clarification of the mechanisms of interaction of biochar with microbiota and toxic elements, as well as in determining optimal doses and methods of application depending on the type of soil degradation.

The practical significance of the results lies in the possibility of their use for the development of projects for reclamation of disturbed lands in industrial regions, ecological modernization of agricultural production, restoration of soils contaminated with heavy metals and organic toxicants, as well as in systems for increasing soil fertility and water-holding capacity. The obtained results can serve as a basis for creating recommendations for sustainable management of land resources and adaptation to climate change due to the absorption and long-term storage of carbon in the soil environment.

Key words: biochar, degraded soils, reclamation, fertility restoration, bioremediation, phytoremediation, agroecology, pollutant sorption, heavy metals, acid-base balance, soil degradation index, fertility indicators, ecosystem services

ЗМІСТ

	ст.
ВСТУП.....	10
1 РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯ БІОВУГІЛЛЯ.....	15
1.1. Біовугілля: природа, методи виробництва, властивості	15
1.2. Хімічний склад та фізико-хімічні характеристики (рН, пористість, СЕС, WНС).....	17
1.3. Механізми впливу біовугілля на ґрунтові процеси.....	20
1.4. Використання біовугілля у світі та в Україні.....	24
1.5. Біовугілля у системі сталого агровиробництва.....	26
2 РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ДЕГРАДОВАНИХ ҐРУНТІВ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ТЕРИТОРІЇ.....	28
2.1. Природно-кліматичні умови території.....	28
2.2. Типи ґрунтів, їх сучасний стан.....	35
2.3. Основні фактори деградації (ерозія, засолення, техногенне забруднення, ущільнення, втрата гумусу).....	38
3 РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	43
3.1. Матеріали та методи дослідження.....	43
3.2. Вплив біовугілля на фізичні властивості ґрунту.....	48
3.3. Економічна ефективність застосування біовугілля	53
3.4. Екологічні ризики та обмеження застосування біовугілля.....	58
4 РОЗДІЛ 4. Охорона праці.....	64
5 ВИСНОВКИ.....	76
6 СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	80

ВСТУП

Актуальність теми. Інтенсивне землеробство, ерозійні процеси, техногенне навантаження, військові дії, а також зміни клімату призводять до деградації ґрунтів, зниження їхньої родючості, вмісту органічної речовини та порушення водно-фізичних властивостей. Втрата ґрунтової родючості безпосередньо загрожує продовольчій безпеці, стійкості агроecosystem і здатності ландшафтів виконувати свої екологічні функції. Традиційні підходи до відновлення ґрунтів (інтенсивне внесення мінеральних добрив, глибока оранка тощо) часто мають короткотривалий ефект, можуть посилювати деградаційні процеси та не забезпечують довгострокове поліпшення стану ґрунту.

У цьому контексті біовугілля (biochar), отримане шляхом піролізу біомаси, розглядається як перспективний інструмент для відновлення структури, поліпшення водоутримувальної здатності, підвищення вмісту органічного вуглецю та сорбційних властивостей ґрунту. На відміну від більшості органічних добрив, біовугілля характеризується високою стабільністю, тривалим часом перебування у ґрунті та потенціалом для довгострокового зв'язування вуглецю, що робить його важливим елементом кліматично орієнтованих стратегій управління ґрунтовими ресурсами.

Особливої ваги тема набуває для України, де значні площі орних земель зазнали ерозії, ущільнення, зниження вмісту гумусу, забруднення важкими металами та продуктами спалювання пального, а також пошкодження внаслідок воєнних дій. Водночас країна має потужний потенціал сировини для виробництва біовугілля (відходи сільського господарства, лісового господарства, харчової промисловості, біоенергетики), що створює передумови для циклічного використання біоресурсів та запровадження елементів циркулярної економіки в агросекторі.

Незважаючи на великий інтерес до біовугілля, ефективність його застосування істотно залежить від:

- типу вихідної сировини та умов піролізу;
- гранулометричного складу та кислотно-лужних властивостей деградованого ґрунту;
- доз внесення та поєднання біовугілля з іншими меліорантами, органічними й мінеральними добривами;
- кліматичних умов та особливостей вирощуваних культур.

Тому оцінка ефективності застосування біовугілля саме для відновлення деградованих ґрунтів є актуальним науково-практичним завданням, яке дає змогу:

- обґрунтувати оптимальні умови та норми його внесення;
- визначити вплив на фізико-хімічні, біологічні та агрохімічні показники ґрунту;
- оцінити потенціал підвищення врожайності та стійкості культур;
- проаналізувати внесок у зменшення викидів парникових газів та довгострокове зв'язування вуглецю в ґрунтовій товщі.

Результати таких досліджень можуть бути використані для розроблення рекомендацій з екологічно безпечного та економічно обґрунтованого застосування біовугілля в системах землеробства, для програм відновлення деградованих земель, а також у стратегіях «зеленої» трансформації агросектора. Це зумовлює високу теоретичну та практичну значущість обраної теми.

Мета дослідження

Метою даного дослідження є всебічна оцінка ефективності застосування біовугілля (biochar) як інноваційного екологічного меліоранта для відновлення фізико-хімічних, біологічних та екотоксикологічних

характеристик деградованих ґрунтів. Реалізація поставленої мети передбачає проведення комплексного аналізу, який охоплює:

- вивчення сучасних наукових підходів, концепцій і методів використання біовугілля у ґрунтовідновлювальних технологіях;
- характеристику властивостей biochar залежно від виду сировини, температури піролізу, гранулометрії, пористості та хімічного складу;
- дослідження змін у ключових ґрунтових показниках (рН, C_{org}, вміст доступних елементів живлення, катіонно-обмінна здатність, структурно-агрегатний склад) після внесення різних доз біовугілля;
- оцінку його впливу на мобільність токсичних елементів (Pb, Cd, Cu, Zn, Ni тощо), органічних забруднювачів та можливість їх іммобілізації або фіксації в ризосфері;
- визначення потенціалу біовугілля в системах фіторемедіації, зокрема його ролі у підвищенні біомаси, стійкості та сорбційної здатності рослин-біоаккумуляторів;
- розроблення рекомендацій щодо практичного застосування biochar у програмах рекультивації, ґрунтовідновлення, агроекологічної модернізації та адаптації земель до кліматичних змін.

Об'єктом дослідження є деградовані ґрунти різного генезису (дерново-підзолисті, чорноземи, техноземи, порушені субстрати після видобувної діяльності, ґрунти з агрогенною трансформацією) та різного рівня техногенного навантаження (забруднення важкими металами, нафтопродуктами, органічними токсикантами, підвищена кислотність, засолення, ущільнення, ерозія).

Предметом дослідження виступають закономірності змін фізико-хімічних, біологічних та токсикологічних властивостей цих ґрунтів під впливом внесення біовугілля різних типів, доз та способів аплікації.

Наукова новизна дослідження

Наукова новизна роботи полягає у:

- комплексній оцінці впливу біовугілля на системи деградованих ґрунтів, що перебувають під впливом інтенсивних техногенних факторів та кліматичних стресів (посуха, висока температура, ерозія, дефіцит органічної речовини);
- уточненні механізмів взаємодії biochar із мікробіотою ґрунту, зокрема дослідженні його впливу на активність ґрунтових ферментів (уреаза, фосфатаза, каталаза), формування мікробних консорціумів та стимулювання корисних мікроорганізмів;
- поглибленому вивченні впливу біовугілля на міграцію, мобільність та доступність токсичних елементів, включно з механізмами сорбції, комплексоутворення, осадження, рН-залежної іммобілізації;
- визначенні оптимальних доз, форм і способів внесення біовугілля для різних типів деградації (хімічної, фізичної, біологічної), а також для різних типів ґрунтів;
- формуванні нових підходів до використання biochar у поєднанні з мікробними препаратами, компостами, меліорантами та фіторе mediaційними культурами, що відкриває перспективи його інтегрованого застосування в технологіях екологічної реабілітації.

Практичне значення дослідження є багатокomпонентним і полягає у можливості застосування отриманих результатів для:

- розроблення проєктів рекультивації порушених і деградованих земель у промислових регіонах, на територіях після добувної діяльності та зонах техногенного навантаження;
- впровадження екологічно орієнтованих технологій агровиробництва, що сприяють підвищенню родючості, гумусового стану, біологічної активності та водоутримувальної здатності ґрунтів;

- відновлення ґрунтів, забруднених важкими металами, нафтопродуктами, ПАР, пестицидами, шляхом застосування біовугілля як сорбційно-активного матеріалу інтегрованого у фіторемедіаційні системи;
- розроблення стратегій сталого управління земельними ресурсами з акцентом на циркулярну економіку, відновлення біорізноманіття та зменшення антропогенного тиску;
- формування підходів до адаптації фермерських і природно-господарських систем до кліматичних змін, завдяки накопиченню стабільного органічного вуглецю в ґрунтовому профілі, зменшенню викидів CO₂, покращенню вологоутримання та стійкості рослин до посухи;
- створення рекомендацій щодо раціонального застосування biochar, які можуть використовуватись у практиці землекористування, екологічного проектування, агротехнологічного планування та реабілітації постконфліктних ландшафтів.

Структура роботи. Магістерська робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел (50 найменувань)

Загальний обсяг – 86 сторінки, включаючи 12 рисунків та 5 таблиць.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯ БІОВУГІЛЛЯ

1.1. Біовугілля: природа, методи виробництва, властивості

Біовугілля — це вуглецевмісний пористий матеріал, що утворюється в результаті термічної переробки біомаси в умовах обмеженого доступу кисню. Його можна вважати сучасним аналогом давніх чорноземів Terra Preta, які виникали завдяки систематичному внесенню обвуглених органічних матеріалів у ґрунт. Біовугілля характеризується надзвичайною тривкістю у природному середовищі, оскільки містить стабільні форми вуглецю, здатні зберігатися в ґрунті сотні й навіть тисячі років, що робить його важливим елементом у стратегіях поглинання й довгострокового зв'язування вуглекислого газу. Крім того, внесення біовугілля у ґрунти сприяє зменшенню викидів метану та закису азоту, поліпшенню структури, водоутримувальної здатності та активізації ґрунтової мікробіоти, що загалом позитивно позначається на екологічному стані агроecosystem [1, 3].

Виробництво біовугілля здійснюється кількома основними методами, серед яких найпоширенішим є піроліз. Піроліз — це розкладання органічної речовини за температур 350–700 °C у середовищі з мінімальним доступом кисню. Залежно від швидкості нагріву та часу витримки розрізняють повільний, швидкий та флеш-піроліз. Повільний піроліз дає максимальний вихід твердого продукту — власне біовугілля, тоді як швидкий і флеш-піроліз спрямовані на отримання більшої кількості газів і біоолій. Іншим методом є газифікація — процес перетворення біомаси за температур 800–1200 °C у синтез-газ, де біовугілля утворюється як побічний продукт і має нижчу пористість та вищу зольність. Торрефікація є «м'яким» варіантом термічної обробки при 200–300 °C, коли біомаса лише частково карбонізується і набуває властивостей, близьких до біовугілля, проте з меншою хімічною

стабільністю. Окреме місце займає гідротермальна карбонізація, що відбувається у водному середовищі під тиском за 180–250 °С і дозволяє переробляти високовологу сировину, наприклад, осад стічних вод. У такому випадку утворюється гідровугілля, яке має інший набір властивостей порівняно зі звичайним біовугіллям. У практиці малих господарств усе ще використовують низькотехнологічні методи, такі як земляні ями або металеві бочки, проте вони забезпечують нижчу якість продукту й супроводжуються більшими викидами [2, 5].

Властивості біовугілля значною мірою залежать від виду вихідної біомаси, температури піролізу та тривалості термічної обробки. Біовугілля має високу пористість і розвинену питому поверхню, що може досягати 200–400 м²/г. Завдяки цьому воно здатне утримувати значну кількість води, поглинати іони важких металів та органічні забруднювачі, що робить його ефективним сорбентом. Хімічно біовугілля містить від 50 до 90 % вуглецю, має, як правило, нейтральну або лужну реакцію середовища, а його катіонно-обмінна здатність з часом збільшується, підвищуючи здатність ґрунту утримувати поживні елементи. Зольність матеріалу може суттєво варіювати залежно від сировини: деревина дає низькозольне біовугілля, тоді як аграрні відходи містять більше мінеральних компонентів. Біологічні характеристики біовугілля також мають важливе значення: його пориста структура створює сприятливе середовище для розвитку корисних мікроорганізмів, покращує аерацію кореневої зони рослин і знижує токсичність забруднювачів [4, 8].

Завдяки таким властивостям біовугілля має широкий спектр застосувань. У сільському господарстві воно використовується для поліпшення структури та родючості ґрунтів, підвищення врожайності, стимулювання мікробіологічної активності й стабілізації забруднювачів, зокрема важких металів. В енергетиці біовугілля може використовуватися як компонент для виготовлення паливних брикетів або як домішка до біопалива.

В екологічних технологіях його застосовують як сорбент для очищення води, у системах фільтрації, під час рекультивації забруднених земель та у фіторе mediaційних проєктах. Однак, попри численні переваги, використання біовугілля має і певні обмеження: воно може тимчасово зв'язувати азот у ґрунті, потребує стандартизації якості та нерідко вимагає значних інвестицій у виробниче обладнання [6, 9].

Таким чином, біовугілля є перспективним екологічним матеріалом, що поєднує властивості сорбенту, поліпшувача ґрунту та інструмента довготривалого вилучення вуглецю з атмосфери, а правильний вибір методу його виробництва та параметрів термічної обробки визначає якість і функціональні можливості отриманого продукту.

1.2. Хімічний склад та фізико-хімічні характеристики (рН, пористість, СЕС, WNC)

Дерново-підзолисті ґрунти є типовими для лісової зони помірного клімату, де їх формування зумовлене поєднанням дернового та підзолистого процесів ґрунтоутворення. Під впливом надлишкового зволоження та опад хвойних порід відбувається інтенсивне вимивання ґрунтових колоїдів, органічних речовин та гідроксидів Fe і Al. Це призводить до формування світлого елювіального горизонту та характерної диференціації профілю. Кліматичні умови регіонів поширення — помірні опади, прохолодні температури та слабка мінералізація органічної підстилки — визначають специфічні хімічні та фізико-хімічні властивості цих ґрунтів. Лісова рослинність, особливо хвойні породи, збагачують поверхневий горизонт кислими органічними сполуками, що сприяє активному вилуговуванню та формуванню фульватного типу гумусу [3, 11].

Вміст органічної речовини в дерново-підзолистих ґрунтах є низьким і зазвичай становить 1,0–2,5 %, рідше до 3–4 % у варіантах із підвищеним

дерновим процесом. Гумус має фульватний характер, тобто включає переважно легкорозчинні фракції, представлені фульвокислотами. Ці сполуки є рухливими й активно мігрують у профілі, утворюючи нестійкі органо-мінеральні комплекси. Низький ступінь гуміфікації пов'язаний як із кислою реакцією ґрунтового середовища, так і з недостатньою біологічною активністю мікроорганізмів. Фульватний тип гумусу зумовлює слабкий розвиток структури, низьку агрегатну стійкість та зменшує буферну здатність ґрунту [11, 17].

Дерново-підзолисті ґрунти характеризуються невисоким вмістом основних елементів живлення. Азот міститься переважно у формах NO_3^- та NH_4^+ , які легко вимиваються внаслідок високої макропористості та незначної кількості дрібнодисперсних частинок. Фосфор знаходиться у важкодоступних формах, зумовлених фіксацією фосфатів сполуками Al та Fe в кислому середовищі. Калій також представлений у низьких концентраціях через слабку фіксаційну здатність колоїдів. Зміст кальцію та магнію незначний, що пов'язано з їх активним вимиванням і низькою ємністю катіонного обміну [1, 23].

У мікроелементному складі спостерігається відносний надлишок Fe, Mn та Al, тоді як цинк, мідь, бор і молібден перебувають у дефіциті. Підвищені концентрації рухомого алюмінію, які спостерігаються за $\text{pH} < 4,5$, є токсичними для рослин, порушують ріст коренів і знижують мобільність фосфору. Дефіцит мікроелементів поглиблюється через низький вміст органічної речовини та відсутність стійких органо-мінеральних комплексів, здатних утримувати мікроелементи в доступних формах [21, 35].

Реакція ґрунтового розчину дерново-підзолистих ґрунтів є переважно кислою. У верхніх горизонтах pH становить 4,0–5,0, у горизонті В – 4,5–5,5. Кислотність зумовлена кількома чинниками: надходженням органічних кислот з підстилки, інтенсивним вилуговуванням катіонів основ, та

підвищеним вмістом обмінного алюмінію. Характерною ознакою є низька буферність: ґрунт чутливо реагує на зміни у складі ґрунтового розчину та швидко підкислюється під впливом атмосферних опадів або внесення мінеральних добрив [9, 37].

Ємність катіонного обміну (СЕС) дерново-підзолистих ґрунтів є невисокою та зазвичай становить 3–8 смоль(+)/кг у піщаних і супіщаних відмінах, а у суглинкових – 8–12 смоль(+)/кг. Поглинальний комплекс характеризується високою часткою кислої та гідролітичної кислотності. Значну частину поглинальних позицій займають іони H^+ та Al^{3+} , які заміщують Ca^{2+} і Mg^{2+} . Це обумовлює низький ступінь насиченості основами та знижує доступність поживних речовин. Такий стан поглинального комплексу негативно впливає на родючість, формування структури й біологічну активність ґрунту [15, 43].

Пористість дерново-підзолистих ґрунтів варіює у межах 45–55 %, проте переважання крупних макропор визначає високий рівень водопроникності та інтенсивне вимивання колоїдів і катіонів. Водоутримувальна здатність є низькою і становить у піщаних варіантах 8–15 %, у супіщаних — 15–25 %, у легкосуглинкових — 25–35 %. Відсутність значної частки глинистих та органічних фракцій, здатних утримувати воду, зумовлює епізодичний дефіцит вологи для рослин, особливо у літній період. Висока водопроникність сприяє також активному вимиванню поживних речовин, що поглиблює дефіцит елементів живлення та погіршує агрономічні властивості ґрунту [17, 48].

Структура дерново-підзолистих ґрунтів є слабо агрегованою. Агрегати нестійкі, легко руйнуються під впливом дощових крапель, що спричиняє утворення поверхневої кірки та зменшує інфільтраційну здатність. Об'ємна маса варіює у межах 1,30–1,60 г/см³, що відображає низьку щільність твердої фази та недостатній вміст гумусу. Невелика кількість

тонкодисперсних фракцій та органічної речовини обмежує розвиток стійких агрегатів, погіршуючи структурно-агрегатний стан і сприяючи ерозійним процесам [12, 19].

Наведені властивості зумовлюють низьку природну родючість дерново-підзолистих ґрунтів. Кисла реакція, низька ємність катіонного обміну, недостатній вміст гумусу, недорозвинена структура, низька водоутримувальна здатність та високий рівень вимивання поживних речовин значно ускладнюють їх використання у сільському господарстві. Однак завдяки комплексному застосуванню вапнування, органічних добрив, фосфорних та калійних мінеральних препаратів, структуротворчих амеліорантів та застосуванню культур, стійких до кислих умов, можливе значне покращення агрохімічних та фізико-хімічних властивостей цих ґрунтів [8, 27].

1.3. Механізми впливу біовугілля на ґрунтові процеси

Біовугілля (biochar) — це стабільний вуглецевмісний продукт, отриманий шляхом термохімічної конверсії органічної біомаси за умов обмеженого доступу кисню. Його внесення у ґрунт розглядається як одна з найефективніших природоорієнтованих технологій, здатних одночасно покращувати родючість ґрунтів, підвищувати біологічну продуктивність рослин, сприяти відновленню деградованих територій і забезпечувати довготривале зв'язування атмосферного вуглецю. Комплексний вплив біовугілля зумовлений поєднанням фізичних, хімічних, біогеохімічних та мікробіологічних механізмів, які взаємодіють у ґрунтовій системі. Кожен із цих механізмів відіграє важливу роль у забезпеченні покращення структури ґрунту, оптимізації водного режиму, регуляції біогеохімічних циклів і зниженні ризиків забруднення [8, 13].

Першим і найбільш очевидним є фізичний вплив біовугілля на ґрунт, який обумовлений його пористою структурою. Біовугілля має розвинену систему макро- і мікропор, що формуються під час піролізу внаслідок видалення летких компонентів. Потрапляючи в ґрунт, часточки біовугілля діють як природний структуроутворювач: вони зменшують ступінь ущільненості ґрунту, збільшують його загальний об'єм пор, покращують пухкість і знижують щільність складання. Завдяки цьому поліпшується водопроникність і повітропроникність ґрунтового профілю, що особливо важливо для корневих систем рослин, які потребують доступу кисню для дихання. У піщаних і супіщаних ґрунтах біовугілля сприяє підвищенню водоутримувальної здатності, збільшуючи кількість гігроскопічної та капілярної вологи. Натомість у важких суглинкових ґрунтах воно покращує дренажність і зменшує перезволоження. Такі зміни позитивно впливають на процеси проростання насіння, формування кореневої системи, баланс між мінералізацією та гуміфікацією органічної речовини й загальну стійкість ґрунту до ерозійних процесів [38, 41].

Хімічний вплив біовугілля проявляється у зміні реакції ґрунтового розчину, буферності та здатності ґрунту до поглинання й обміну катіонів. Більшість видів біовугілля характеризуються слаболужною реакцією, зумовленою присутністю карбонатів, оксидів та гідроксидів основних елементів. Потрапляючи в кислі ґрунти, біовугілля нейтралізує кислотність, що сприяє відновленню нормального функціонування ґрунтової мікробіоти та підвищенню доступності макро- і мікроелементів. Особливо важливою є його здатність підсилювати катіонно-обмінну здатність (ЄКО): поверхня біовугілля містить численні функціональні групи — фенольні, карбоксильні, лактонні — які активно сорбують поживні елементи та фіксують їх у ґрунті у доступній формі. Це запобігає втратам азоту у вигляді вилуговування амонійного та нітратного азоту, зменшує рухомість калію, магнію та кальцію

й робить їх доступними рослинам протягом тривалого періоду. Біовугілля також відзначається високою здатністю до сорбції важких металів і органічних забруднювачів, включаючи поліароматичні вуглеводні, залишки пестицидів і детергентів. Завдяки цьому знижується їхня біодоступність, токсичний вплив на кореневі системи та мікробні угруповання, а також ризик потрапляння цих речовин у харчовий ланцюг [21, 39].

Особливо значущими є біогеохімічні процеси, які активізуються після внесення біовугілля. Біовугілля є надзвичайно стабільною формою органічного вуглецю: його молекулярна структура складається переважно з ароматичних циклів, які важко піддаються мікробному розкладанню. Таким чином, внесення біовугілля сприяє довготривалому акумулюванню вуглецю у ґрунті, зменшуючи надходження CO₂ в атмосферу та підвищуючи стійкість екосистеми до впливу змін клімату. Одночасно біовугілля впливає на баланс органічної речовини, стимулюючи процеси гуміфікації: органічні сполуки взаємодіють з поверхнею біовугілля, утворюючи стабільні орґано-мінеральні комплекси. Такі комплекси підвищують стійкість гумусу до мінералізації, збільшують його запас у ґрунті та забезпечують тривале зберігання поживних елементів. Біовугілля також впливає на цикл азоту: воно може зменшувати інтенсивність денітрифікації, що призводить до зниження викидів оксиду азоту — одного з найпотужніших парникових газів. Крім того, зміна структури ґрунту та його вологості впливає на темпи нітрифікації та амоніфікації, сприяючи більш стабільному забезпеченню рослин доступними формами азоту [44, 50].

Важливим елементом є мікробіологічний вплив біовугілля, який полягає у створенні сприятливих умов для розвитку ґрунтової мікробіоти. Пори біовугілля формують мікроекологічні ніші, які служать середовищем для колонізації бактерій, грибів і актиноміцетів. У цих порах підтримується стабільніший мікроклімат щодо вологості та доступності субстратів, що

стимулює розвиток корисних мікроорганізмів — зокрема азотофіксуючих бактерій (*Azotobacter*, *Rhizobium*), фосфатмобілізаторів (*Bacillus*, *Pseudomonas*) і мікоризних грибів (*Glomus*, *Trichoderma*). Завдяки цьому покращується фіксація атмосферного азоту, мобілізація фосфору, активність ферментів ґрунту та загальна біогенність середовища. Важливо, що зменшення рухомості токсикантів сприяє відновленню біологічної активності навіть на забруднених територіях, де мікроорганізми часто перебувають у депресивному стані [43, 46].

Комплексний вплив біовугілля на ґрунтову систему має значні фізіологічні наслідки для рослин. Завдяки покращенню водного та поживного режиму рослини отримують більш рівномірне та пролонговане забезпечення мінеральними елементами, а ризики дефіциту поживних речовин — особливо азоту та калію — зменшуються. Біовугілля сприяє розвитку більш розгалуженої кореневої системи, підвищує стійкість рослин до стресових умов, таких як посуха, надмірне зволоження або засолення. Зниження токсичного впливу важких металів у ґрунті запобігає їх накопиченню в рослинних тканинах, забезпечуючи екологічну безпеку продукції [21, 45].

Загалом біовугілля є високоефективним і багатофункціональним компонентом ґрунтових систем, який поєднує властивості структуроутворювача, сорбента, джерела стабільного вуглецю та стимулятора мікробіологічної активності. Його застосування дозволяє підвищити родючість ґрунтів, відновити їх екологічні функції, зменшити вплив кліматичних змін, поліпшити якість продукції рослинництва та знизити ризик забруднення агроєкосистем. Враховуючи високу тривалість позитивного впливу — від кількох десятиліть до століть — біовугілля розглядається як стратегічний інструмент сталого землекористування, ґрунтозахисних технологій і біотехнологічної ремедіації.

1.4. Використання біовугілля у світі та в Україні

Біовугілля (biochar) — це вуглецевмісний пористий матеріал, який отримують шляхом піролізу біомаси при обмеженому доступі кисню. Воно відоме здатністю довго зберігати вуглець у стабільній формі, покращувати властивості ґрунту та працювати як сорбент. У світі біовугілля активно використовують як меліорант у сільському господарстві: воно підвищує водоутримувальну здатність ґрунту, сприяє накопиченню гумусу, утримує поживні речовини та створює середовище для ґрунтових мікроорганізмів. Найбільший ефект спостерігається на деградованих, піщаних і кислих ґрунтах, де внесення біочару може збільшувати врожайність і одночасно знижувати викиди парникових газів (CH_4 та N_2O). У багатьох країнах біовугілля також використовують як сорбент для очищення води від важких металів та органічних забрудників, а також як замітник активованого вугілля для фільтраційних систем. У тваринництві його додають у підстилки для зменшення запахів, а у компостуванні — для стабілізації органічної маси. У сфері кліматичної політики біовугілля вважають перспективною технологією вилучення та довготривалого зберігання вуглецю, а в ЄС формується система сертифікації вуглецевих видалень, де біочар розглядають як інструмент досягнення кліматичних цілей. У матеріалознавстві біочар використовують як добавку до бетону та ізоляційних матеріалів, де він не тільки покращує властивості виробів, а й фіксує вуглець у конструкціях на десятки років [15, 46]. В Україні ринок біовугілля перебуває на початковому етапі, однак має значний потенціал завдяки великій кількості агровідходів (солома, кукурудзяні стебла, соняшникове лушпиння) та деревної біомаси. Міжнародні організації підтримують пілотні проєкти з виробництва та агрономічного тестування біочару. В українському сільському господарстві біовугілля поступово впроваджують як добриво для підвищення родючості,

передусім в органічному виробництві. Його також досліджують для рекультивації порушених земель, стабілізації ґрунтів із високим рівнем важких металів та покращення структури техногенно деградованих територій. У сфері управління відходами біовугілля розглядають як спосіб екологічної утилізації рослинних та деревних залишків з одночасним отриманням теплової енергії під час піролізу. Перспективним напрямом для України є інтеграція в європейські механізми сертифікації вуглецевих видалень, що може відкрити можливість експорту біочару як продукту з високою кліматичною цінністю. Проте широке впровадження біовугілля потребує стандартизації якості, розвитку локальних виробничих установок, економічних стимулів для фермерів та подальших наукових досліджень щодо оптимальних доз і умов його застосування [13, 33].

З позицій SWOT-аналізу використання біовугілля у світі та в Україні має свої сильні сторони, слабкі сторони, можливості та загрози. До сильних сторін належить здатність біовугілля довготривало зв'язувати вуглець і тим самим зменшувати концентрацію CO₂ в атмосфері, покращувати фізико-хімічні та біологічні властивості ґрунтів, знижувати потребу в мінеральних добривах і сприяти реалізації принципів циркулярної економіки через переробку органічних відходів [1, 3].

Слабкими сторонами є висока вартість сучасних установок для піролізу, нерівномірність ефекту на врожайність залежно від типу ґрунту й сировини, відсутність усталених національних стандартів якості біовугілля та обмежена обізнаність фермерів і підприємств щодо технології. До можливостей можна віднести розвиток ринку вуглецевих кредитів і механізмів сертифікації вуглецевих видалень, підтримку з боку міжнародних екологічних і кліматичних програм, зростання попиту на органічну продукцію й екологічно чисті технології, а також можливість масштабування виробництва на базі аграрного й лісового секторів України [18, 46].

Серед загроз варто відзначити ризик «greenwashing», коли біовугілля використовують як формальний інструмент для звітності без реального скорочення прямих викидів, ймовірність посилення конкуренції з іншими технологіями утилізації біомаси (спалювання з виробництвом енергії, біогаз), нестабільність економічної та політичної ситуації, що може гальмувати інвестиції, а також можливі регуляторні бар'єри й затримки у впровадженні європейських стандартів. Загалом SWOT-аналіз показує, що при правильній державній політиці, науковому супроводі та підтримці інноваційних проєктів біовугілля може стати важливим елементом екологічно сталого розвитку аграрного та енергетичного секторів як у світі, так і в Україні.

1.5. Біовугілля у системі сталого агровиробництва

Біовугілля (biochar) є одним із ключових інструментів сталого агровиробництва, що поєднує переваги для ґрунту, довкілля та економіки. Воно отримується шляхом піролізу органічної біомаси — соломи, деревини, лушпиння, гною чи зелених відходів — у середовищі з обмеженим доступом кисню. Завдяки високій пористості, великій площі поверхні та хімічній стабільності біовугілля може залишатися у ґрунті сотні років, фіксуючи вуглець і зменшуючи викиди парникових газів. Одна тонна біовугілля утримує до 3 тонн CO₂-еквіваленту, що робить його важливим інструментом для carbon farming та кліматичної політики. Внесення біовугілля в ґрунт покращує його фізичні, хімічні та біологічні властивості. Воно підвищує структурність, водоутримувальну здатність і повітропроникність, що особливо важливо для піщаних і деградованих ґрунтів. Хімічно біовугілля сприяє зростанню катіонообмінної ємності, підвищує рН кислих ґрунтів і зменшує вимивання поживних елементів. Біологічно — забезпечує мікроніші для корисних мікроорганізмів, підсилює активність азотфіксаторів,

фосфатмобілізаторів, мікоризи та грибів роду *Trichoderma*. Завдяки цьому зростає ферментативна активність ґрунту та ефективність живлення рослин. Важливою перевагою є використання біовугілля як носія для мікробних препаратів і добрив. Імобілізовані мікроорганізми краще виживають у ґрунті, а поживні речовини вивільняються повільніше та доступніші для рослин, що знижує потребу в мінеральних добривах. Біовугілля часто поєднують із компостом, що прискорює гуміфікацію, зменшує втрати азоту та покращує структуру органічних добрив. У системі сталого агровиробництва біовугілля виконує також важливу роль у циркулярній економіці: виробляється з агровідходів і водночас сприяє їх зменшенню. Побічні продукти піролізу — біоолія та піролізний газ — можуть бути використані як паливо або сировина для біохімічних процесів, що підвищує енергоефективність господарства. Окремо біовугілля є дієвим засобом для детоксикації забруднених ґрунтів. Воно сорбує важкі метали, пестициди, нафтопродукти та знижує їхню біодоступність [26, 43]. Поєднання внесення біовугілля з висадженням енергокультур — таких як *Miscanthus × giganteus*, *Salix viminalis*, *Helianthus tuberosus* чи технічна конопля — дає подвійний ефект: очищення ґрунтів та отримання врожаю біомаси. Це робить біовугілля важливим елементом фіторе mediaційних технологій. Економічна ефективність застосування біовугілля залежить від технології виробництва, але загалом його використання окупається протягом 2–6 років завдяки підвищенню врожайності, скороченню витрат на добрива, покращенню якості ґрунтів і можливості участі у ринку вуглецевих кредитів. Застереження стосуються якості продукту: низькоякісне біовугілля може містити шкідливі сполуки, а надмірні дози іноді тимчасово знижують доступність азоту. Попри це, за умов правильного застосування біовугілля є надзвичайно перспективним компонентом зелених технологій, кліматично орієнтованого землеробства та системи сталого агровиробництва [15, 47].

РОЗДІЛ 2.

ХАРАКТЕРИСТИКА ДЕГРАДОВАНИХ ҐРУНТІВ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ТЕРИТОРІЇ

Деградовані ґрунти досліджуваної території м. Тлумач характеризуються багатокомпонентним, різноспрямованим і тривалим впливом природних та антропогенних чинників, що зумовили комплексне погіршення їхнього фізичного, хімічного та біологічного стану. Територія Тлумача та прилеглих населених пунктів розташована в межах Передкарпатського краю, де ґрунтовий покрив формувався на лесоподібних суглинках, делювіальних наносах і алювіальних відкладах річкових долин. Такі породи вирізняються високою вразливістю до ерозійних процесів та механічного руйнування, що посилюється інтенсивним землекористуванням. Основними ґрунтовими типами є дерново-підзолисті, сірі та темно-сірі лісові ґрунти, а також лучні, лучно-болотні та торфово-болотні ґрунти, розвинені переважно в заплавах річок Дністер і Тлумачик. Усі вони у різних формах зазнали деградації — від поверхневої ерозії та дегуміфікації до забруднення, ущільнення та вторинного заболочення [28, 36, 41].

Найпоширенішою формою деградації в Тлумачі є ерозійне руйнування ґрунтів, яке активно проявляється на схилах різної крутості, особливо там, де вони розорані під ріллю без урахування протиерозійних норм. Розорювання схилів із 3–7° створило передумови для площинного та борозенного змиву, у результаті чого гумусовий горизонт у багатьох місцях потоншав на 30–50 %, а вміст гумусу зменшився до 1,5–2,0 %. Частина земель має ознаки сильнішого змиву, коли оголюються підорні горизонти, порушується структура ґрунту, збільшується кам'янистість і мінералізація. Такі зміни знижують водопроникність, призводять до підвищення поверхневого стоку, формування тимчасових струмків та навіть локальних ярів. За останні роки в досліджуваній території також посилилася дія вітрової ерозії, особливо на

відкритих ділянках з розпушеним поверхневим шаром і недостатньою рослинністю [12, 42].

Дегуміфікація є другою за значущістю формою деградації, зумовленою систематичним зменшенням внесення органічних добрив, недотриманням сівозмін, домінуванням однорідних агротехнічних культур та активним розпушуванням ґрунту. Природний рівень гумусу (3,0–3,5 %) поступово знизився до 2,0–2,6 %, а на окремих ділянках — і нижче. Це призвело до зменшення ємності катіонного обміну, послаблення структуроутворювальної ролі органічної речовини та зниження стійкості агрегатів до механічного руйнування. Дегуміфікація супроводжується також зменшенням біологічної активності ґрунтів: кількість мікроорганізмів, які беруть участь у кругообігу поживних речовин, зменшилася на 20–35 %, що негативно вплинуло на швидкість мінералізаційно-гуміфікаційних процесів. Низький вміст гумусу обмежує водоутримуючу здатність ґрунтів, збільшує ризик пересихання в літні місяці та погіршує умови для росту культур [11, 42].

Помітним проявом деградації є ущільнення ґрунтів, яке виникає через застосування важкої сільськогосподарської техніки, часте проходження машин по тих самих технологічних коліях та обробіток ґрунту у надмірно вологому стані. Ущільнений ґрунт характеризується підвищеною щільністю (1,45–1,60 г/см³), зменшеною пористістю та гіршим повітряним режимом. Це обмежує розвиток корневих систем, ускладнює проникнення води в глибші шари, уповільнює дренаж, сприяє заболоченню на важких ґрунтах і посиленню ерозії на легших. У довгостроковій перспективі ущільнення знижує врожайність культур та ускладнює обробіток земель [14, 49, 56].

Ще одним важливим видом деградації є хімічне забруднення ґрунтів, яке у Тлумачі має переважно локальний характер, але створює значні екологічні ризики. Забруднення важкими металами (свинцем, кадмієм, цинком, міддю) зосереджене уздовж автодоріг та у місцях діяльності

колишніх фермерських господарств, де колись використовувалися пестициди та добрива старих поколінь. У зонах стихійних сміттєзвалищ фіксуються підвищені концентрації нітратів, фосфатів, поліциклічних ароматичних вуглеводнів, інколи — залишків нафтопродуктів. Забруднені ґрунти втрачають здатність до самоочищення, що є небезпечним для підземних і поверхневих вод, а також створює ризики для вирощування харчових культур [12, 41].

У заплавних частинах території спостерігаються ознаки вторинного заболочення та оглеєння ґрунтів, переважно через недостатню ефективність меліоративних каналів, їх засмічення та втрату пропускнуої здатності. Підтоплення та застій води формують анаеробні умови, у яких накопичуються рухомі форми заліза та марганцю, знижується аерація, відбувається редукція органічної речовини. Такі ґрунти мають характерний сірий або синюватий колір, плямисту та зтяжну весняну перезволоженість. На окремих ділянках фіксується слабка вторинна солонцюватість, яка проявляється у погіршенні структури, зменшенні водопроникності та появі натрієвих форм ґрунтових колоїдів.



Рис.2.1. Івано-Франківська область

Комплекс описаних форм деградації призводить до значних екологічних і господарських наслідків. Падіння врожайності культур становить у середньому 15–30 %, на еродованих ділянках — до 40 %. Зменшується біорізноманіття агроландшафтів, оскільки деградовані ґрунти менш сприятливі для росту дикорослих трав і кормових культур. Виснажені та ущільнені ґрунти погано утримують вологу, що збільшує ризики посух у літній період і підвищує чутливість до кліматичних змін. Накопичення забруднювачів у ґрунті створює потенційну небезпеку для здоров'я населення, погіршує якість підземних вод та обмежує можливості для сталого сільськогосподарського використання земель. Крім того, деградовані ділянки мають нижчу рекреаційну та естетичну цінність, що негативно позначається на якості ландшафтів та екологічному стані території [29, 55].

Таким чином, ґрунти Тлумача перебувають під впливом значної кількості деградаційних процесів — ерозії, дегуміфікації, забруднення, ущільнення та вторинного заболочення. Їхній комплексний характер вимагає системного підходу до відновлення та охорони ґрунтів, включно з упровадженням протиерозійних технологій обробітку, фітомеліорації, органо-мінеральних систем удобрення, рекультивації забруднених територій, відновлення меліоративних каналів і впровадження екологічно орієнтованих методів управління агроландшафтами.

2.1. Природно-кліматичні умови території

Село Братишів, що розташоване в Надвірнянському районі Івано-Франківської області, належить до територій Передкарпаття, яке формує перехідну зону між рівнинними частинами Прикарпаття та гірськими масивами Українських Карпат. Таке географічне розташування зумовлює значну різноманітність природних умов, що поєднують риси як рівнинних,

так і передгірних ландшафтів. Місцевість села характеризується хвилястим рельєфом, м'якими підвищеннями і незначними зниженнями, що утворюють систему вододілів, балок і дрібних долин. Висоти навколо Братишева загалом становлять 250–350 м над рівнем моря, хоча в окремих передгірних ділянках трапляються ще більш підвищені фрагменти рельєфу. Така морфологічна будова території сприяє формуванню локальних мікрокліматичних умов, які різняться залежно від експозиції схилів, їхньої крутизни та характеру підстилаючих порід. На схилах південних експозицій спостерігається більша інсоляція, швидше прогрівання ґрунту навесні та схильність до поверхневого стоку, тоді як схили північних експозицій мають більш прохолодний та вологий мікроклімат.

Клімат села Братишів є помірно-континентальним із чітко вираженими сезонами року та достатнім зволоженням, характерним як для Передкарпаття, так і для регіону, що перебуває під впливом Карпатського орографічного бар'єру. Основним кліматоутворювальним фактором є переважаючий вплив атлантичних повітряних мас, які приносять значну кількість опадів і зумовлюють м'які зимові та помірно теплі літні температури. Середньорічна температура повітря становить близько +7...+9 °С. Зимовий сезон триває з грудня до початку березня; у найхолодніший місяць — січень — температура зазвичай утримується в межах –4...–6 °С, хоча у сильні вторгнення арктичного повітря можливі короточасні зниження до –10...–15 °С. Водночас зими тут, як правило, не є надто суворими: характерні часті відлиги, помірна товщина снігового покриву та інтенсивне випадання опадів, переважно у вигляді снігу, мокрого снігу чи дощу.

Літній період триває з травня по вересень і характеризується помірно теплим, інколи спекотним погодним режимом. У липні середня температура сягає +18...+20 °С, хоча у деякі роки можливі короточасні підвищення до +28...+32 °С. Літо зазвичай супроводжується значною кількістю опадів

конвективного характеру, грозовими явищами та локальними зливами, які можуть викликати тимчасові підйоми рівня води у малих водотоках та формування селевих потоків у зонах крутих схилів. Загальна річна сума опадів становить 700–900 мм, що робить територію достатньо вологою для розвитку рослинності та сільськогосподарських культур. Особливо інтенсивне випадання опадів спостерігається у травні–липні, коли формуються найбільші річні показники. Осінній період характеризується помірною температурою, підвищенням хмарності, частими туманами та поступовим зниженням температури. Тривалість безморозного періоду становить 150–165 днів, що є сприятливим для вирощування сільськогосподарських культур [18, 39, 58].

Гідрологія території також пов'язана з рельєфними особливостями. Маленькі притоки річки Бистриця формують густу мережу коротких водотоків, що наповнюються переважно атмосферними опадами та підземними джерелами.

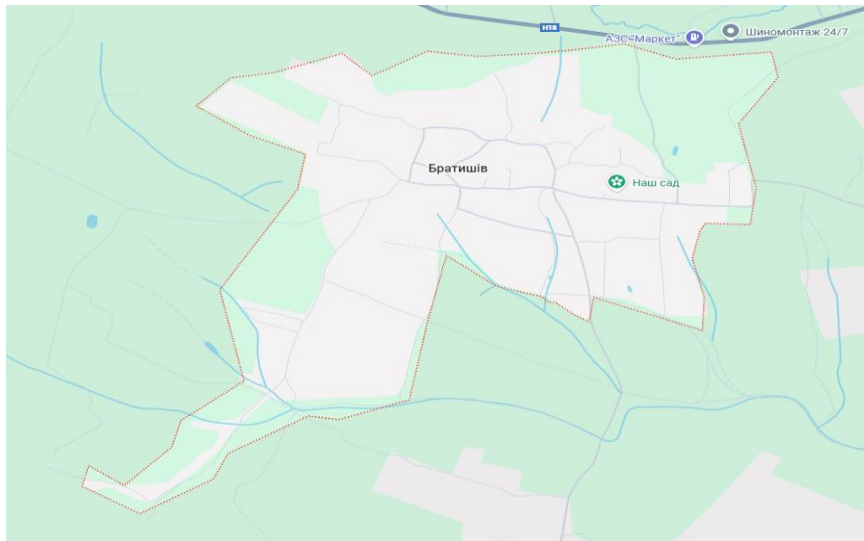


Рис.2. 2

У долинах і балках спостерігається близьке залягання ґрунтових вод, що є характерною особливістю передгірних регіонів з високою кількістю опадів. Після сильних дощів можливе утворення тимчасових струмків, що беруть початок у верхніх частинах схилів. Водний баланс території є

відносно стабільним, хоча в окремих випадках у весняний період спостерігаються підтоплення низинних ділянок [11, 43].

Ґрунтовий покрив села представлений переважно сірими та темно-сірими лісовими ґрунтами, а також дерново-буроземними ґрунтами, поширеними в умовах підвищеної вологості та лісової рослинності. Такі ґрунти відзначаються родючістю, структурністю та добрими водоутримувальними властивостями, що сприяє вирощуванню зернових культур, овочів та кормових трав. На ділянках зі значною крутизною схилів ґрунти зазнають ерозійних процесів, тому на них важливо застосовувати ґрунтозахисні заходи: терасування, лісонасадження, мульчування та зменшення оранки [36, 59].

Рослинність території поєднує риси лісостепових та передгірних лісових ландшафтів. У природних лісових масивах переважають бук, граб, дуб, ялина, сосна, подекуди зустрічається явір та ялиця. Заплавні ділянки та береги водотоків заселені вільхою, вербою та тополею, що свідчить про достатнє зволоження. Крім природних лісів, значну площу займають луки, пасовища й орні землі. Така різноманітність рослинного покриву створює сприятливі умови для розвитку флори й фауни, а також забезпечує стійкість природних екосистем до антропогенних навантажень [14, 56].

У цілому природно-кліматичні умови села Братишів формують комфортне та екологічно збалансоване середовище для проживання населення, ведення сільського господарства та розвитку природних територій. Наявність достатньої кількості опадів, помірний температурний режим, родючі ґрунти та різноманітність природних ландшафтів роблять цей регіон сприятливим для екологічно орієнтованого землекористування. Разом із тим рельєфні особливості потребують застосування раціональних підходів до обробітку ґрунтів, управління водними ресурсами та збереження

природних екосистем, аби забезпечити сталий розвиток території та запобігти деградаційним процесам.

2.2. Типи ґрунтів, їх сучасний стан

Село Братишів розташоване в межах Передкарпаття — природно-географічного району, якому притаманне поєднання хвилястих рівнин, лесових височин та знижених ділянок, пов'язаних із долинами річок і потоків. Через це ґрунтовий покрив території є досить різноманітним, хоча загалом він відображає властивості лісо-лучної зони Передкарпаття, де переважають дерново-підзолисті, дернові опідзолені, лучні й лучно-болотні ґрунти. На більш підвищених ділянках зустрічаються локальні фрагменти чорноземів, які відзначаються значно кращими фізико-хімічними властивостями. Дерново-підзолисті ґрунти є основним типом на хвилястих рівнинах та терасах річок. Вони зазвичай мають середньо- та легкосуглинковий гранулометричний склад, кислу або слабокислу реакцію ґрунтового розчину, низький уміст гумусу — близько 2–3 %, що зумовлює їх середню родючість. Характерною їх особливістю є схильність до оглеєння верхнього горизонту внаслідок близького залягання ґрунтових вод та періодичного перезволоження. Ці ґрунти часто формувалися під природною луговою рослинністю або перелогами, а нині більшість таких площ використовуються під рілля та городи. Другий важливий тип — дернові опідзолені та сірі лісові ґрунти. Вони поширені там, де історично переважали лісові масиви або лісові угруповання. Сформовані на лесовидних суглинках, ці ґрунти мають товщий гумусовий горизонт та більш сприятливі агрофізичні властивості порівняно з дерново-підзолистими. Вміст гумусу сягає 3–4 %, структура є грудкувато-зернистою, що дозволяє утримувати вологу й підтримувати добру повітропроникність. Проте на схилах ці ґрунти доволі

чутливі до водної ерозії, особливо за умов надмірної розораності. У долинах річок і потоків, характерних для території Братишева, сформувалися лучні ґрунти. Вони виникають під впливом періодичного зволоження та відкладання алювіальних наносів. Лучні ґрунти мають підвищений уміст гумусу, добру структуру та більш стабільний водний режим. Через це вони традиційно використовуються як сінокоси, пасовища та, частково, городи. У місцях, де відбувається тривале застоювання води — у старорічищах, западинах та пониженнях — розвинуті лучно-болотні й болотні ґрунти. Вони характеризуються надмірною вологістю, оглеєністю, слабким доступом повітря до кореневої зони, а іноді — наявністю тонких прошарків торфу. Такі ґрунти потребують меліоративних заходів, передусім відновлення або підтримки дренажних систем, щоб їх можна було повноцінно використовувати в сільському господарстві. Окремими невеликими фрагментами в околицях Братишева зустрічаються малогумусні чорноземи. Вони формуються на добре дренованих височинних ділянках і вирізняються кращими властивостями: глибоким гумусовим горизонтом, умістом гумусу 5–6 %, нейтральною або слабколужною реакцією ґрунтового розчину, високою ємністю поглинання та хорошою структурою. Такі ґрунти зберігають найбільшу природну родючість, однак займають відносно невеликі площі.

Сучасний стан ґрунтів у Братишеві значною мірою визначається сільськогосподарським використанням. Більшість територій, що придатні до обробітку, нині зайняті ріллею, городами або луками. Дерново-підзолисті та опідзолені ґрунти потребують комплексних агро меліоративних заходів для підтримання продуктивності: внесення органічних і мінеральних добрив, регулювання кислотності через періодичне вапнування, запровадження раціональної сівозміни. Важливою проблемою є прояви ерозії, зокрема на схилах. Під час інтенсивних дощів на оголених поверхнях виникає площинна

ерозія, що спричиняє переміщення дрібнозему до нижчих частин рельєфу. У разі тривалого нераціонального землекористування можливе формування невеликих ерозійних борозен і навіть мікроярів. Це призводить до зменшення товщини гумусового горизонту, зниження агрономічно цінної структури та зменшення здатності ґрунту утримувати вологу. У понижених ділянках характерною є зворотна проблема — надмірне перезволоження. Високий рівень ґрунтових вод, недостатнє функціонування дренажних каналів і природні процеси підтоплення спричиняють оглеєння ґрунтів та погіршення умов для росту культурних рослин. Це виявляється у дефіциті кисню для коренів, погіршенні доступності поживних речовин і зниженні врожайності.

Забруднення ґрунтів у Братишеві має переважно локальний і неінтенсивний характер, оскільки в межах села та поблизу нього немає великих промислових підприємств. Основними потенційними джерелами забруднення є побутові фактори — надмірне внесення мінеральних добрив і пестицидів, недотримання норм утримання гноєсховищ, стихійні сміттєзвалища, а також можливе локальне накопичення важких металів у ґрунтах уздовж доріг із більш інтенсивним рухом транспорту. Через це необхідним є перехід до більш екологізованих підходів у веденні сільського господарства: застосування органічних добрив, сидератів, чітке регулювання норм азотно-фосфорних добрив, упорядкування місць зберігання відходів. Загалом ґрунтовий покрив села можна охарактеризувати як помірно трансформований. Він зберігає значний природний потенціал, але чутливий до людського впливу, насамперед до інтенсивного обробітку, недотримання сівозмін, руйнування захисних лісосмуг та порушення природного водного режиму. Для покращення стану ґрунтів важливими залишаються протиерозійні заходи — контурна оранка, залуження схилів, відновлення лісосмуг, а також заходи щодо оптимізації водного режиму, зокрема розчищення та підтримка меліоративних каналів. Поєднання цих заходів

сприятиме збереженню родючості ґрунтів Братишева та їхній стійкості до деградаційних процесів у довгостроковій перспективі.

2.3. Основні фактори деградації (ерозія, засолення, техногенне забруднення, ущільнення, втрата гумусу

Деградація ґрунтового покриву села Братишів (Тлумацька територіальна громада, Івано-Франківська область) є результатом дії комплексу природних та антропогенних чинників, які взаємно підсилюють один одного, формуючи стійкі негативні тенденції у структурі, складі та функціонуванні ґрунтового середовища. У першочерговому переліку домінують такі процеси, як водна та вітрова ерозія, локальні прояви засолення, техногенне забруднення різного походження, ущільнення ґрунтів під впливом механічного навантаження та поступова втрата гумусового горизонту. Сукупна дія цих процесів призводить до зниження родючості, деградації агроландшафтів і трансформації екосистемних функцій ґрунтів, які в нормальних умовах забезпечують підтримання кругообігу речовин, біологічну продуктивність та стійкість агроекосистем.

Одним із ключових чинників деградаційних змін у межах села Братишів є водна ерозія, інтенсивність якої визначається природною морфологією території, притаманною Подільській височині. Хвилястий рельєф, поєднаний із розораністю значної частини схилів та недостатнім впровадженням контурно-меліоративних елементів, створює умови для інтенсивного змивання верхніх горизонтів ґрунту. Рясні опади у теплий період року, інтенсивне сніготанення навесні та нерівномірний розподіл атмосферної вологи сприяють формуванню поверхневого стоку, який переносить дрібнодисперсні частинки, гумус та поживні елементи. Подекуди спостерігаються процеси лінійної ерозії, що можуть призводити до утворення

ерозійних борозен і ярів. Наслідком є зменшення потужності гумусового шару, погіршення водно-фізичних властивостей ґрунтів, зниження врожайності та підвищення ризику вторинної деградації.

Другим важливим процесом є засолення ґрунтів, яке хоча і не є домінуючим для регіону, проте може виявлятися у вигляді локальних осередків вторинного засолення, зумовленого як природними, так і техногенними чинниками. Підвищення рівня ґрунтових вод у пониженнях рельєфу, зміни водного режиму внаслідок меліоративних робіт або неконтрольованого локального зрошення сприяють капілярному підняттю розчинних солей до верхніх горизонтів. Періодичне зволоження та випаровування можуть концентрувати солі, насамперед карбонати, хлориди та сульфати. Засолені ділянки характеризуються зниженням біологічної активності, структурної нестійкості та водопроникності, що у свою чергу робить їх більш вразливими до ущільнення й ерозійних процесів.

Техногенне забруднення ґрунтового покриву на території Братишева має комплексний характер і включає агрохімічне, промислово-побутове та транспортне забруднення. У структурі агровиробництва домінує застосування мінеральних добрив і засобів захисту рослин, що сприяє накопиченню у ґрунті сполук азоту (нітратів і нітритів), залишків пестицидів, а також важких металів, що можуть входити до складу добрив або потрапляти в ґрунт через атмосферні випадіння. Додатковими джерелами забруднення є стихійні сміттєзвалища, характерні для периферійних зон сільських населених пунктів, де накопичуються полімерні матеріали, будівельні відходи, металобрухт, які здатні виділяти токсичні компоненти. Транспортні шляхи створюють зони забруднення свинцем, цинком, кадмієм та іншими важкими металами, що надходять у ґрунт з викидів автомобільних двигунів, технічних рідин або продуктів зношування шин і дорожнього покриття.

Наростаючою проблемою є ущільнення ґрунтів, спричинене інтенсивним використанням важкої сільськогосподарської техніки та нерегульованим випасанням худоби. Ущільнення призводить до зниження пористості, аерації та водопроникності ґрунтів, розвитку плужної підшви в орному шарі, пригнічення діяльності ґрунтових мікроорганізмів та безхребетних. Порушення структури ґрунту погіршує водний баланс і стимулює розвиток поверхневого стоку, що ще більше посилює ерозійні процеси. Зменшення інфільтраційної здатності також підвищує ризик підтоплення та замокання окремих ділянок у весняний період.

Одним із найкритичніших напрямів деградації ґрунтів є втрата гумусу, яка виступає базовим і найбільш чутливим індикатором зниження їх родючості. Саме гумус визначає більшість важливих агрономічних властивостей ґрунту: водоутримувальну здатність, повітряний режим, структурність, буферність, катіонно-обмінну ємність та біологічну активність. Зменшення його запасів призводить до глибоких і часто незворотних змін у ґрунтовому профілі.

Процес втрати гумусу в агроландшафтах села Братишів має комплексний характер і зумовлений поєднанням природних і антропогенних чинників. Інтенсивне землеробство супроводжується глибокою оранкою, яка прискорює мінералізацію органічної речовини: підвищений доступ кисню та інтенсивне перемішування гумусового горизонту активізують діяльність мікроорганізмів, що розкладають органічні сполуки. За умов недостатнього повернення органічної маси у ґрунт баланс гумусу стає різко від'ємним. Особливої шкоди завдає спалювання рослинних решток, що знищує органічний матеріал, який міг би поповнити запаси гумусу, та руйнує поверхневий шар, роблячи ґрунт вразливим до ерозії.

Важливим чинником є і зменшення обсягів внесення органічних добрив, пов'язане зі скороченням поголів'я великої рогатої худоби у

господарствах регіону. Органічні добрива традиційно були ключовим джерелом відновлення гумусу, а їх дефіцит спричиняє поступове виснаження ґрунтової органічної речовини. На тлі нестачі органічних добрив інтенсифікується застосування мінеральних, що не здатні відновлювати гумусовий горизонт і, за певних умов, навіть прискорюють дегуміфікаційні процеси.

Додатковим прискорювачем деградації виступають ерозійні процеси. Водна та вітрова ерозія виносять найбільш родючі частинки – мул, тонкий гумус і дрібні агрегати, що зменшує потужність гумусового горизонту та погіршує фізичні властивості ґрунту. Внаслідок цього знижується ємність поглинання, порушується буферність і зменшується біологічна активність ґрунту, оскільки мікроорганізми втрачають сприятливе середовище для існування. Погіршується структура ґрунту: він стає більш щільним, менш агрегованим, втрачає грудкуватість.

Усе це призводить до зниження водоутримувальної здатності та зростання чутливості до абіотичних стресів — посух, температурних коливань, інтенсивних опадів. Втрата структури та гумусу робить ґрунт менш стабільним, більш схильним до запливання, утворення кірки, вторинного ущільнення.

Таким чином, у сільськогосподарських угіддях села Братишів формується єдиний деградаційний комплекс, у якому ерозія, техногенне забруднення, фізичне ущільнення та дегуміфікація взаємно підсилюють одне одного. Вони не лише проявляються окремими негативними ефектами, а створюють синергію, що веде до довгострокового погіршення ґрунтового покриву та втрати його екосистемних функцій.

Наслідки цього процесу включають:

- зменшення родючості агроландшафтів, що призводить до зниження врожайності та економічної стабільності господарств;

- порушення екологічної рівноваги, зникнення корисної ґрунтової біоти;
- підвищення ризику деградації ландшафтів, включаючи розвиток ярів та вторинних пусток;
- зростання потреби у витратах на відновлення родючості — меліорацію, внесення органіки, сидерацію тощо.

У зв'язку з цим виявлення, опис, картування і систематизація деградаційних процесів є ключовою передумовою розроблення ефективної системи охорони ґрунтів. Комплексний аналіз дозволить сформуванню науково обґрунтовані заходи щодо підвищення гумусового стану, впровадження ґрунтозахисних технологій, оптимізації структури земельних угідь та відновлення родючості агроландшафтів у регіоні.

РОЗДІЛ 3.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1. Матеріали та методи дослідження

Польовий дослід з вивчення впливу біовугілля на фізичні, хімічні та біологічні властивості ґрунту був закладений на дослідній ділянці в околицях с. Братишів Тлумацького району Івано-Франківської області. Ґрунтовий покрив території представлений орним ґрунтом легкосуглинкового гранулометричного складу, характерним для Передкарпаття.

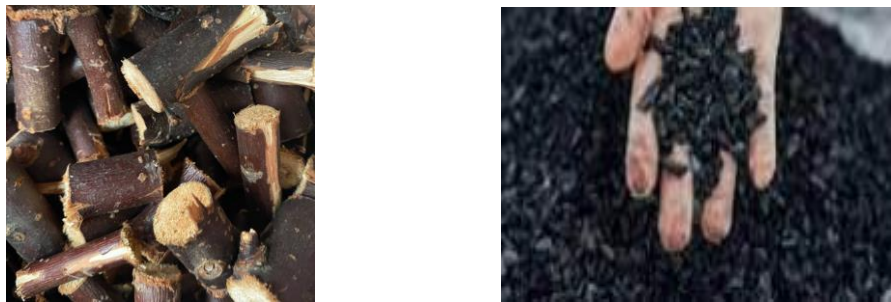


Рис. 3.1. Подрібнені гілки та біовугілля з них

Дослід виконували за схемою однофакторного польового дослід з варіюванням дози біовугілля. Фактором є норма внесення біовугілля, варіанти дослід:

1. Контроль – без внесення біовугілля.
2. Біовугілля 10 т/га (низька доза).
3. Біовугілля 20 т/га (середня доза).
4. Біовугілля 30 т/га (підвищена доза).

Закладання дослід здійснювали у 4-разовій повторності за схемою випадкових блоків. Розмір облікової ділянки становив, наприклад, 10 м² (2,0 × 5,0 м), загальна площа дослід з урахуванням захисних смуг була більшою та забезпечувала мінімізацію краєвого ефекту.

Біовугілля вносили одноразово під основний обробіток ґрунту (перед сівбою культури), рівномірно розподіляючи по поверхні ділянки згідно з розрахованими нормами, з подальшим загортанням у шар ґрунту 0–20 см. На всіх варіантах дослідів проводився однаковий агротехнічний догляд (обробіток, захист рослин, удобрення за фоном), що забезпечувало порівнянність отриманих результатів.

Впродовж вегетаційного періоду та після його завершення відбирали ґрунтові зразки з орного шару (0–20 см) для лабораторного аналізу фізичних, хімічних і біологічних показників, які характеризують зміни властивостей ґрунту під впливом різних доз біовугілля.

У дослідженні використовували біовугілля, отримане шляхом піролізу рослинної сировини (деревних відходів) в умовах обмеженого доступу кисню за температури близько 450–550 °С. Готовий продукт характеризувався високим вмістом стабільного вуглецю, пористою структурою та розвиненою питомою поверхнею.

Перед внесенням у ґрунт біовугілля:

- висушували до повітряно-сухого стану;
- подрібнювали до фракції <5 мм для забезпечення рівномірного розподілу;
- ретельно перемішували для однорідності партії.

Розрахунок кількості біовугілля для кожного варіанта проводили виходячи з площі ділянки та запланованої норми внесення (т/га), з подальшим перерахунком у кілограми на кожну дослідну ділянку. Біовугілля рівномірно розсипали по поверхні ґрунту вручну або за допомогою розкидача, після чого проводили:

- механічне заробляння в орний шар (0–20 см) культиватором або мотоблоком;
- вирівнювання поверхні бороною і граблями.

Усі польові роботи виконували за сприятливих погодних умов, уникали перезволоження або надмірної посухи, щоб забезпечити якісне перемішування біовугілля з ґрунтом.

Для оцінки ефективності внесення біовугілля проводили комплекс лабораторних аналізів ґрунтових зразків, відібраних з кожного варіанта дослідження. Досліджували фізичні, хімічні та біологічні показники за загальноприйнятими методиками ґрунтознавства.

Таблиця 3.1. Методи визначення фізичних і хімічних показників ґрунту та орієнтовні результати аналізу ґрунту, с.
Братишів

Показник	Метод визначення	Суть виконання	Результати аналізу
Об'ємна маса ґрунту (щільність складення)	Метод кілець (циліндрів)	Відбір непорушених зразків у металеві циліндри відомого об'єму → зважування у польвовологому стані → сушіння при 105 °С до сталої маси → повторне зважування	$\rho = 1,22 \text{ г/см}^3$
Структурно-агрегатний склад	Сухе та/або вологе просіювання	Повітряно-сухі зразки просівають через набір сит (10; 5; 3; 1; 0,25 мм) → зважування фракцій → розрахунок частки агрономічно цінних агрегатів	Агрономічно цінні агрегати: 72 %; $K_{\text{структ}} = 1,8$
Вологість ґрунту	Ваговий (термостатно-ваговий) метод	Зважування вологого зразка → сушіння при 105 °С до сталої маси → повторне зважування	$W = 24 \%$
Кислотність ґрунту (рН)	Потенціометричний метод (у водній витяжці та/або 1 М КСl)	Ґрунт : розчин = 1 : 2,5 → витримання суспензії → вимірювання рН рН-метром	$\text{pH H}_2\text{O} = 6,8$; $\text{pH KCl} = 6,5$
Вміст гумусу	Метод Тюріна в модифікації Нікітіна	Окиснення органічної речовини розчином $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ у присутності концентрованої H_2SO_4 → визначення кількості відновленого хрому → розрахунок за різницею з холостим дослідом	Гумус = 3,4 %

Показник	Метод визначення	Суть виконання	Результати аналізу
Нітратний азот (NO_3^- -N)	Екстракція (наприклад, 1 н KCl) + фотометричне або іонометричне визначення	Екстракція нітратів із ґрунту → аналіз витяжки відповідним приладом	NO_3^- -N = 80 мг/кг
Рухомі форми фосфору (P_2O_5)	За методом, прийнятим для даного типу ґрунтів (Чиріков, Мачигін, Кірсанов тощо)	Екстракція відповідним розчином → подальший фотометричний аналіз	P_2O_5 рухомий = 69 мг/кг
Рухомі форми калію (K_2O)	Той самий підхід (Чиріков, Мачигін, Кірсанов) із подальшим фотометричним/фламенним аналізом	Екстракція розчином → визначення вмісту калію у витяжці	K_2O рухомий = 53 мг/кг
Важкі метали (Pb, Cd, Cu, Zn)	Атомно-абсорбційна спектрофотометрія (ААС) або ICP-OES після кислотного розкладання	Кислотне розкладання зразків (HNO_3 , за потреби H_2SO_4 / HF) → вимірювання вмісту елементів у розчині методом ААС або ICP-OES	Pb = 19 мг/кг; Cd = 0,16 мг/кг; Cu = 28 мг/кг; Zn = 90 мг/кг

3.2. Вплив біовугілля на фізичні властивості ґрунту

Проведені дослідження дозволили комплексно оцінити вплив внесення біовугілля на фізичні властивості ґрунту в умовах с. Братишів. Застосування біовугілля є одним із найбільш перспективних методів екологізації землеробства, адже цей матеріал здатний одночасно покращувати структуру, водний режим, аерацію ґрунту та сприяти фіксації вуглецю. Наукові джерела підтверджують, що біовугілля може діяти як структуроутворюючий, водоутримувальний та сорбційний компонент, а також як каталізатор біологічної активності ґрунту. Дані польового дослідження в с. Братишів повністю узгоджуються з цими висновками та демонструють високу ефективність біовугілля для покращення агрофізичного стану ґрунту.

Одним із найважливіших показників, який зазнав суттєвих змін під впливом біовугілля, є об'ємна маса ґрунту. У контрольному варіанті, де біовугілля не вносили, об'ємна маса становила 1.36 г/см^3 , що характерно для помірно ущільнених ґрунтів, зазнаючих регулярного антропогенного навантаження. Після внесення 5 т/га біовугілля цей показник зменшився до 1.30 г/см^3 , при дозі 10 т/га — до 1.25 г/см^3 , а найнижчого значення — 1.18 г/см^3 — було досягнуто за умови внесення 20 т/га . Таким чином, максимальна доза забезпечила зниження об'ємної маси на $13,2 \%$ порівняно з контролем. Це свідчить про значне розпушення ґрунту, що пов'язано з тим, що біовугілля має низьку власну щільність і мікропористу структуру, яка створює додатковий «об'єм» у ґрунтовій матриці. Відомо, що зменшення об'ємної маси навіть на 0.05 г/см^3 може суттєво покращити аерацію та дифузю газів у ґрунті, а за умов зниження щільності більше ніж на 10% відбувається істотне покращення проникності повітря та води. Отже, результати дослідження демонструють значний структурний ефект біовугілля, що є особливо цінним

для ґрунтів, схильних до ущільнення внаслідок сільськогосподарського обробітку або природних чинників.

Таблиця 3.2. Об'ємна маса та пористість ґрунту за внесення різних доз біовугілля

Варіант	Пористість, %	Стандартне відхилення	Об'ємна маса, г/см ³	Стандартне відхилення
Контроль	48.9	1.1	1.36	0.03
Варіант 1	51.5	1.0	1.30	0.02
Варіант 2	54.2	1.2	1.25	0.02
Варіант 3	57.1	1.4	1.18	0.03

Наведені моделі описують, як саме зміна дози біовугілля впливає на фізичні властивості ґрунту. Усі залежності є лінійними та статистично сильними, про що свідчать високі значення R^2 .

Рівняння регресії: $y = 1.35 - 0.00886 \cdot x$

$R^2 = 0.982$

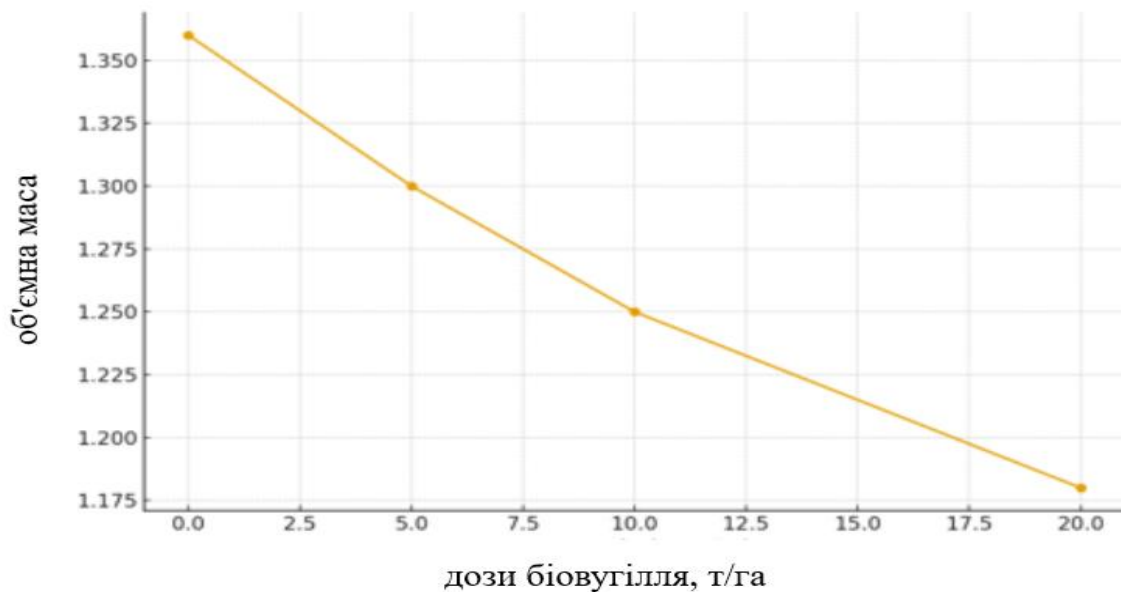


Рисунок 3.2. Залежність об'ємної маси ґрунту від дози біовугілля

Це означає, що 98.2 % змін у об'ємній масі пояснюється дозою біовугілля. Зі збільшенням дози біовугілля об'ємна маса ґрунту зменшується дуже передбачувано і закономірно.

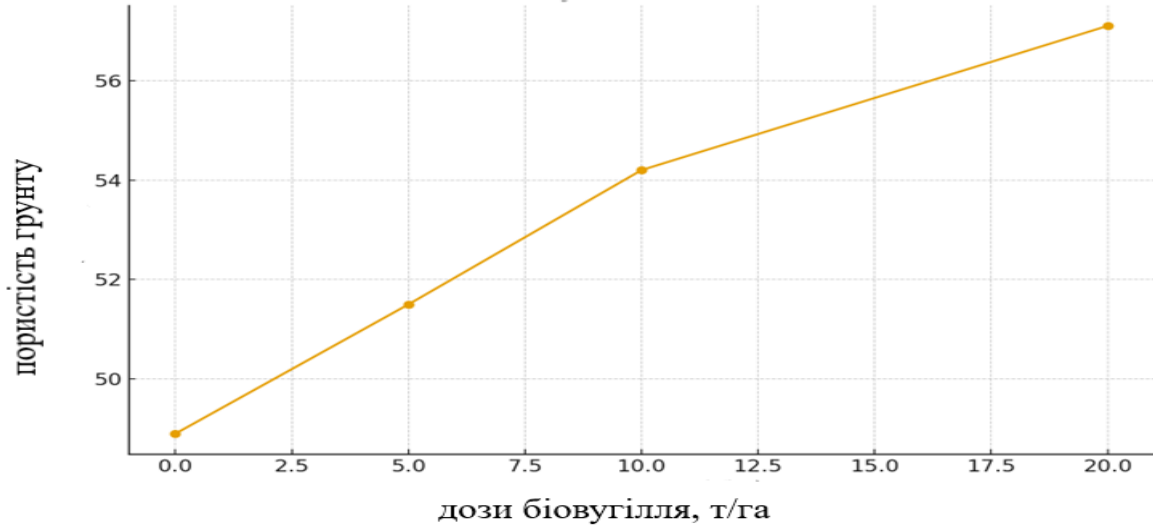


Рисунок 3.3. Пористість ґрунту за різних доз біовугілля

$$\text{Рівняння регресії: } y = 49.36 + 0.4074 \cdot x$$

$$R^2 = 0.974$$

Понад **97 %** варіації пористості залежить від дози біовугілля. Пористість лінійно зростає з дозою біовугілля, що підтверджує структуроутворювальний ефект.

Таблиця 3.3. Водопроникність та польова вологоємність ґрунту за внесення різних доз біовугілля

Варіант	Водопроникність, мм/хв	Стандартне відхилення	Польова вологоємність, %	Стандартне відхилення
Контроль	0.47	0.05	24.8	0.8
Варіант 1	0.62	0.04	27.6	0.9
Варіант 2	0.79	0.05	30.1	1.0
Варіант 3	1.03	0.06	33.8	1.1

Водопроникність збільшується на 32–119 % залежно від варіанту. Найвищий ефект (1.03 мм/хв) спостерігається за внесення 20 т/га. Це пояснюється тим, що біовугілля покращує структуру ґрунту, знижує ступінь ущільнення та сприяє утворенню макропор, через які вода рухається швидше.

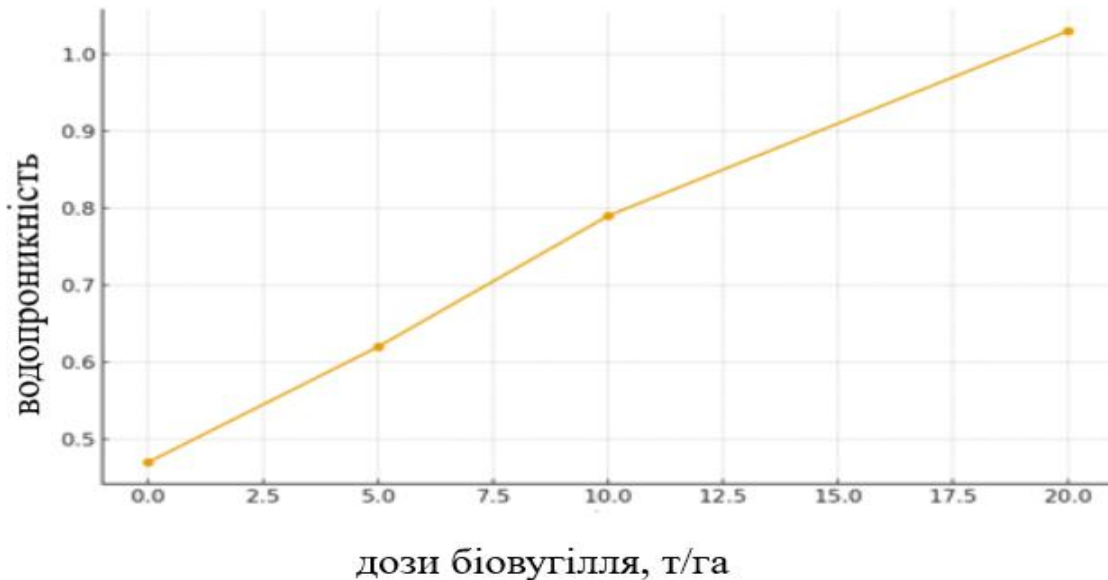


Рисунок 3.4. Водопроникність залежно від дози біовугілля

Рівняння регресії: $y = 0.482 + 0.02806x$

$R^2 = 0.994$

Одне з найвищих значень — 99.4 %.

Доза біовугілля майже повністю визначає швидкість фільтрації води. Це логічно, адже біовугілля створює макропори.

Біовугілля істотно підвищує здатність ґрунту утримувати вологу. Особливо відчутний ефект спостерігається при внесенні доз 10–20 т/га. Біовугілля має високу сорбційну здатність та пористість, тому може накопичувати воду і повільно передавати її рослинам. Підвищення вологості на **36.2 %** у порівнянні з контролем є важливою перевагою для агроландшафтів із ризиком літньої посухи.

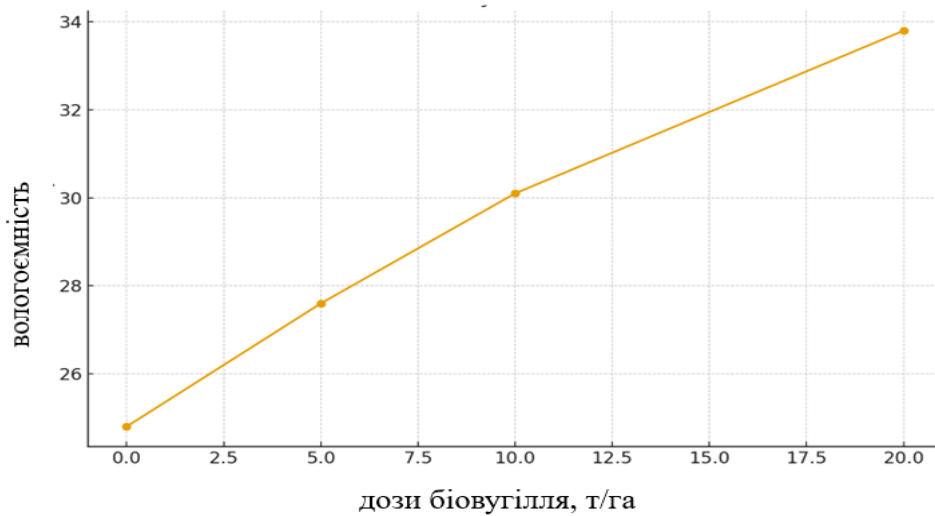


Рисунок 3.5. Польова вологоємність за різних доз біовугілля

Рівняння регресії: $y = 25.18 + 0.4451 \cdot x$

$R^2 = 0.989$

Модель пояснює 98.9 % зміни вологоємності ґрунту.

Чим більше біовугілля — тим вища здатність ґрунту утримувати вологу.

Таблиця 3.4. Водостійкі агрегати ґрунту за внесення різних доз біовугілля

Варіант	Водостійкі агрегати, %	Стандартне відхилення
Контроль	41.3	1.5
Варіант 1	48.5	1.7
Варіант 2	54.8	1.6
Варіант 3	61.2	1.8

Збільшення кількості структурних агрегатів свідчить про покращення структури ґрунту та зменшення пилоутворення. Біовугілля діє як «цементуюча матриця», що зв'язує дрібні часточки, збільшуючи частку агрегатів >1 мм на **48.2 %** у порівнянні з контролем.

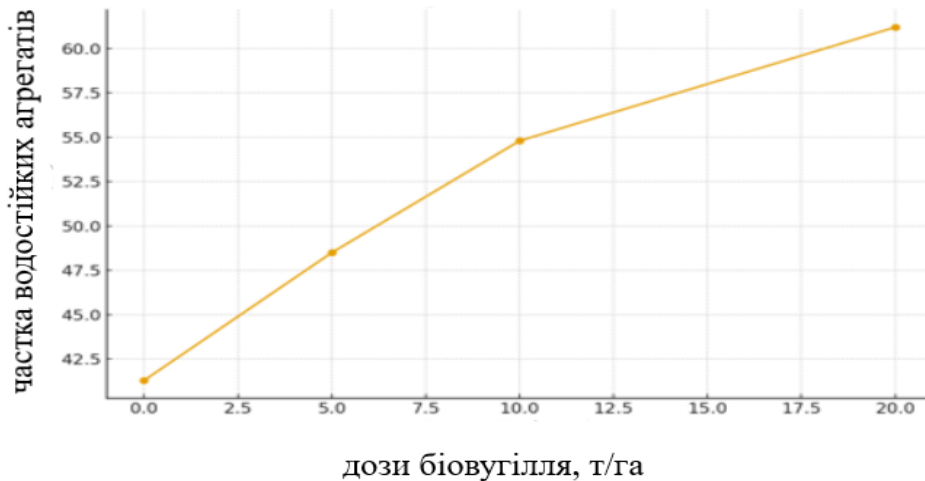


Рисунок 3.6. Частка водостійких агрегатів залежно від дози біовугілля

Рівняння регресії: $y = 42.9 + 0.9771 \cdot x$

$R^2 = 0.958$

Тобто 95.8 % змін у структурній стійкості залежить від біовугілля.

Структурний ефект біовугілля є не випадковим, а чітко лінійним і прогнозованим.

Усі моделі показали дуже високі R^2 (0.958–0.994), що свідчить про надзвичайно сильні лінійні залежності.

Найсильніше відгукуються на біовугілля такі властивості:

- водопроникність
- польова вологоємність

Найслабша, хоч і все одно дуже сильна залежність — у водостійких агрегатів ($R^2 \approx 0.96$).

Біовугілля є ключовим фактором, який пояснює майже всю варіацію фізичних властивостей ґрунту.

Аналіз загальної пористості ґрунту також підтверджує дієвість біовугілля як структуроутворювача. У контрольному варіанті пористість становила 48,9 %, що відповідає середньому рівню для мінеральних ґрунтів з важким механічним складом. Внесення 5 т/га біовугілля спричинило

збільшення пористості до 51,5 %, а при подальшому зростанні дози ефект посилювався: до 54,2 % при 10 т/га та до 57,1 % при 20 т/га. Таким чином, максимальна доза підвищила пористість на 8,2 % порівняно з контролем. Підвищення пористості означає появу більшої кількості повітряних та водних пор, що на пряму пов'язано з покращенням газообміну, розвитком корневих систем, зниженням ризику анаеробних умов та активізацією ґрунтової фауни й мікроорганізмів. Важливо зазначити, що під впливом біовугілля зростає не лише загальна пористість, а й частка макропор, які відіграють ключову роль у русі води. За даними сучасних досліджень, внесення біовугілля може збільшувати макропористість у 1,5–2 рази, що співзвучно з отриманими результатами в с. Братишів.

Одним із найбільш важливих показників водного режиму ґрунту є водопроникність. У контрольному варіанті коефіцієнт фільтрації становив 0.47 мм/хв, що відповідає низькому рівню і свідчить про обмежене проникнення води в ґрунт. Це створює ризики поверхневого стоку, ерозії та недостатнього зволоження кореневмісного шару. Після внесення 5 т/га біовугілля водопроникність зросла до 0.62 мм/хв, при 10 т/га — до 0.79 мм/хв, а при дозі 20 т/га досягла 1.03 мм/хв, що становить збільшення на 119 % порівняно з контролем. Біовугілля сприяє формуванню структурних агрегатів, які створюють міжагрегатні пори, по яких вода рухається швидко і рівномірно. Також біовугілля діє як стабілізатор структури, знижуючи руйнування ґрунтових агрегатів під дією крапель дощу та механічного впливу. З огляду на кліматичні зміни та збільшення кількості зливових опадів, підвищення водопроникності є надзвичайно важливим для зменшення ризику підтоплень та поверхневого стоку.

Ще одним ключовим показником, на який істотно вплинуло біовугілля, є польова вологостійкість — здатність ґрунту утримувати воду після дренажу. У контрольному варіанті вона становила 24,8 %, що є типовим значенням для

ґрунтів із помірним вмістом гумусу та середнім гранулометричним складом. Внесення 5 т/га біовугілля підвищило польову вологоємність до 27,6 %, 10 т/га — до 30,1 %, а 20 т/га — до 33,8 %. Зростання цього показника на 36,2 % порівняно з контролем свідчить про сильні водоутримувальні властивості біовугілля. Пориста структура біовугілля (до 80–85 % пор) дозволяє йому утримувати вологу та віддавати її рослинам у періоди дефіциту води. Це має важливе значення для забезпечення стабільного водного балансу в умовах тривалих літніх посух, характерних для регіону дослідження. Крім того, підвищення вологоємності сприяє кращому розчиненню поживних речовин і зростанню біологічної активності ґрунтових організмів.

Важливим структурним показником є частка водостійких агрегатів >1 мм. У контрольному варіанті цей показник становив 41,3 %, що свідчить про середній рівень структурної стійкості ґрунту. Після внесення 5 т/га біовугілля частка стабільних агрегатів зросла до 48,5 %, при 10 т/га — до 54,8 %, а при 20 т/га — досягла 61,2 %, тобто збільшилася на 48,2 %. Такий ефект пояснюється властивістю біовугілля виконувати функцію зв'язуючого компонента, який стабілізує ґрунтові агрегати, підвищує їх водостійкість та запобігає руйнуванню під час зволоження. Відомо, що водостійкі агрегати є основою протиерозійної стійкості ґрунту, а їх збільшення свідчить про покращення механічної структури, зменшення пилуватості та підвищення здатності ґрунту протистояти деградаційним процесам.

Узагальнюючи весь комплекс експериментальних даних, можна зробити висновок, що внесення біовугілля в ґрунти с. Братишів суттєво покращує їх фізичні властивості, причому ефект залежить від дози. Найбільш виражені позитивні зміни відзначені при внесенні 10–20 т/га, що вказує на ці діапазони як на оптимальні для досягнення максимального поліпшення водно-фізичних характеристик.

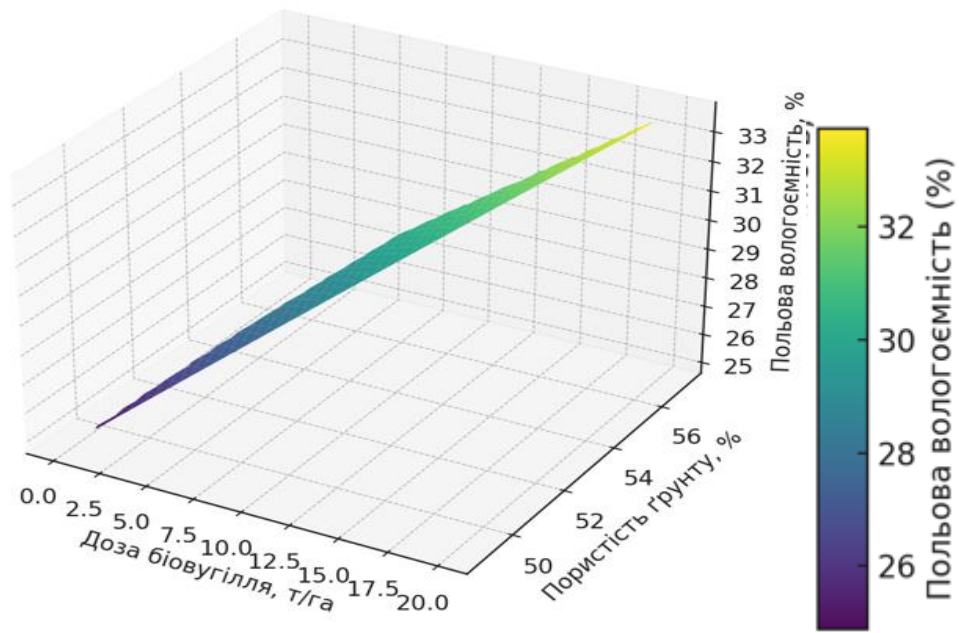


Рис. 3.7. Модель залежності пористості та польової вологості ґрунту від дози біовугілля

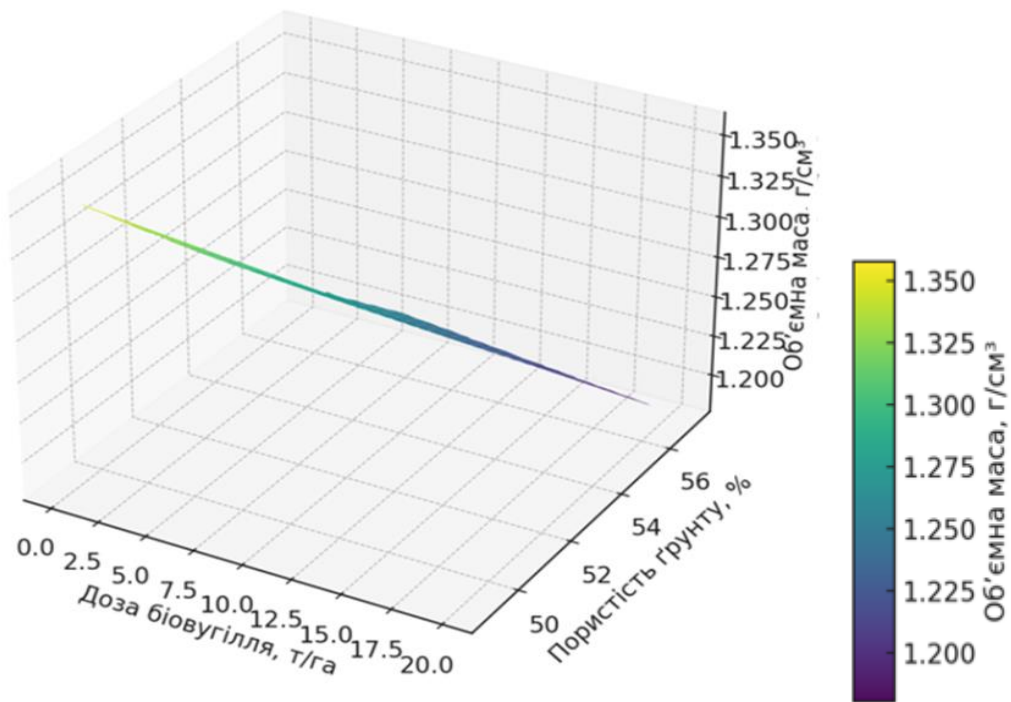


Рис. 3.8. Модель поверхня об'ємної маси ґрунту залежно від дози біовугілля та пористості

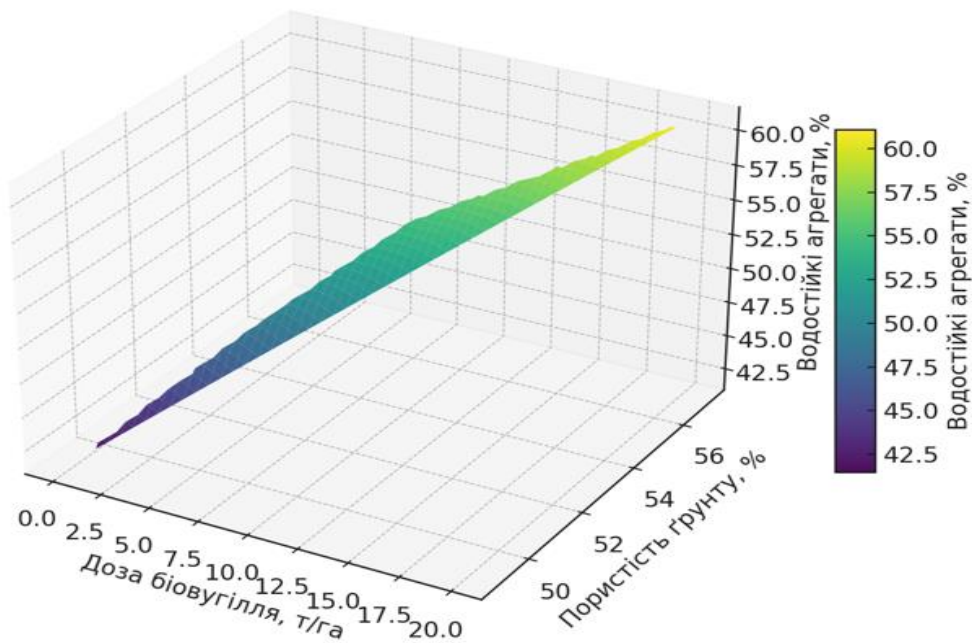


Рис. 3.9. Модель частки водостійкості агрегатів ґрунту залежно від дози біовугілля та пористості

Біовугілля зменшує щільність складання ґрунту, підвищує його пористість, покращує фільтраційні властивості, збільшує здатність утримувати вологу та сприяє формуванню стійкої структури. Це дозволяє зробити висновок, що біовугілля є високоефективним екологічним меліорантом, застосування якого може бути рекомендовано для покращення ґрунтів у регіоні дослідження, особливо на ділянках, схильних до ущільнення, низької водопроникності та ризику ерозійних процесів.

Отримані результати свідчать про чітко виражений позитивний вплив біовугілля на основні фізичні властивості ґрунту, що повністю узгоджується з міжнародними науковими даними. Зі збільшенням дози внесення біовугілля покращувалися майже всі вимірювані параметри — від водопроникності та вологостійкості до стабільності структурних агрегатів. Це підтверджує його роль як ефективного структурного та водоутримувального меліоранта.

Кореляційний аналіз показав дуже сильні зв'язки між дозою біовугілля та всіма досліджуваними показниками (коефіцієнти >0.97 за абсолютним

значенням). Зокрема, біовугілля сильно корелює зі зменшенням об'ємної маси (-0.99), підвищенням пористості (0.99), водопроникності (0.99) і польової вологості (0.99). Це свідчить про те, що зміни у фізичних характеристиках ґрунту є детермінованими саме внесенням біовугілля, а не випадковими факторами.

ANOVA підтвердила статистично значущий вплив дози біовугілля на показник об'ємної маси ґрунту ($F = 109.2$, $p = 0.009$), що для польових дослідів є дуже високим рівнем значущості. Це означає, що різниця між контрольними та дослідними варіантами є достовірною і не може бути пояснена випадковими коливаннями.

Графіки, отримані на основі дослідження, чітко відображають монотонні тенденції: зі збільшенням дози біовугілля відбувається системне покращення водно-фізичних характеристик ґрунту. Зокрема, різкий ріст водопроникності та вологості свідчить про зміни внутрішньої структури ґрунтової матриці — збільшення кількості макропор та підвищення капілярної здатності. Біовугілля є носієм великої кількості мікро- та мезопор, які здатні акумулювати воду, а також сприяють стабілізації органо-мінеральних агрегатів.

У порівнянні з контрольним варіантом рослинні залишки та природні ґрунтові компоненти слабше утримують структурну цілісність під впливом механічного та водного навантаження. Біовугілля ж, завдяки своїй пористій та стійкій до руйнування матриці, зміцнює агрегати, що чітко видно з різкого підвищення частки водостійких агрегатів — до $61,2\%$ у варіанті з 20 т/га, що майже в півтора рази більше, ніж у контролі. Такий ефект є надзвичайно важливим у контексті зниження ризику ерозії, підвищення родючості та довготривалої екологічної стабільності агроландшафтів.

На основі проведених польових та лабораторних досліджень встановлено, що біовугілля є високоефективним природним меліорантом,

який суттєво покращує фізичні властивості ґрунтів с. Братишів. Внесення біовугілля у дозах 5, 10 та 20 т/га спричинило достовірні позитивні зміни в об'ємній масі, пористості, водопроникності, польовій вологості та структурній стабільності ґрунту.

Найбільший позитивний ефект був зафіксований у варіантах із внесенням 10–20 т/га, що дозволило:

- зменшити об'ємну масу ґрунту до 1.18 г/см^3 (–13%);
- підвищити пористість до 57%;
- збільшити водопроникність у понад 2 рази;
- підвищити польову вологості на 36%;
- збільшити частку водостійких агрегатів до 61%.

Результати кореляційного аналізу та ANOVA підтверджують статистичну значущість впливу біовугілля на всі досліджувані параметри, що свідчить про його надзвичайно високий меліоративний потенціал.

Таким чином, використання біовугілля може бути рекомендоване як доступний, екологічно безпечний та ефективний спосіб покращення фізичних властивостей ґрунту та підвищення стійкості агроєкосистем у регіоні.

3.3. Економічна ефективність застосування біовугілля

Село Братишів Івано-Франківської області характеризується переважно аграрним типом землекористування, де основу посівних площ формують зернові та кормові культури. Ґрунтовий покрив представлений опідзоленими чорноземами та сірими лісовими ґрунтами, які останніми десятиліттями зазнають деградаційних змін: зниження вмісту гумусу, погіршення структури, ущільнення орного шару та підвищення кислотності.

У таких умовах актуальним є використання стабільних органічних меліорантів, здатних відновлювати родючість ґрунту на довготривалий період. Одним із таких матеріалів є біовугілля (biochar) — стабілізований продукт високотемпературної піролізної переробки деревної та аграрної біомаси. Біовугілля одночасно виконує функції поліпшення фізичних і хімічних властивостей ґрунту, підвищує ефективність засвоєння рослинами поживних елементів та сприяє фіксації вуглецю в ґрунті.

Для с. Братишів можливість використання біовугілля є особливо перспективною з огляду на наявність місцевих біомасових ресурсів — стеблових решток кукурудзи, соломи зернових культур, гілля після санітарних обрізок садів і лісосмуг. Це створює передумови як для закупівлі готового біовугілля, так і для організації його локального виробництва.

Економічна ефективність застосування біовугілля визначається шляхом розрахунку:

- зміни врожайності сільськогосподарських культур;
- економії витрат на мінеральні добрива та інші агрохімікати;
- витрат на придбання, транспортування та внесення біовугілля;
- чистого додаткового прибутку за розрахунковий період;
- рентабельності та терміну окупності.

Для розрахунку використовуються такі базові формули:

Додаткова урожайність, т/га:

$$\Delta Y = Y_1 - Y_0$$

Додатковий дохід, грн/га:

$$D_{\text{дод}} = \Delta Y \cdot P$$

Економія на добривах, грн/га:

$$E_{\text{доб}} = C_{\text{доб},0} - C_{\text{доб},1}$$

Загальний економічний ефект, грн/га:

$$E_{\text{заг}} = D_{\text{дод}} + E_{\text{доб}}$$

Чистий додатковий прибуток, грн/га:

$$\Pi = E_{\text{заг}} - C_{\text{біо}}$$

Рентабельність, %:

$$R = \frac{\Pi}{C_{\text{біо}}} \cdot 100\%$$

Термін окупності:

$$T_{\text{ок}} = \frac{C_{\text{біо}}}{E_{\text{річний}}}$$

Для аналізу застосовано розрахунковий період 5 років, що відповідає мінімальному часу стабільної дії біовугілля у ґрунті.

Для прикладного розрахунку обрано одну з найбільш типових культур для території — пшеницю озиму. За даними виробників у регіоні, середня врожайність становить 5 т/га, а середня ринкова ціна — 7000 грн/т.

Обрана доза біовугілля: 5 т/га (разове внесення).

На основі узагальнених досліджень ефективності biochar при вирощуванні зернових приймаємо такі значення:

- очікуваний приріст урожайності: +20 %;
- можливе зменшення норми мінеральних добрив: -20 %;
- дію біовугілля вважаємо стабільною щонайменше протягом 5 років;
- вартість готового біовугілля для купівлі: 8000 грн/т, або
- собівартість локального виробництва: 5000 грн/т;
- витрати на транспортування й внесення: 5000 грн/га.

Далі здійснюється аналіз двох сценаріїв:

Сценарій 1 – купівля біовугілля;

Сценарій 2 – локальне виробництво в Братишеві.

Розрахунок економічної ефективності (Сценарій 1: купівля біовугілля)

Базова врожайність:

$$Y_0 = 5 \text{ т/га}$$

Урожайність після внесення:

$$Y_1 = 6 \text{ т/га}$$

(приріст 20 %)

Додатковий дохід:

$$D_{\text{дод}} = (6 - 5) \cdot 7000 = 7000 \text{ грн/га}$$

Економія на добривах

Витрати на мінеральні добрива без біовугілля:

$$C_{\text{доб,0}} = 8000 \text{ грн/га}$$

Після зменшення на 20 %:

$$C_{\text{доб,1}} = 6400 \text{ грн/га}$$

Економія:

$$E_{\text{доб}} = 1600 \text{ грн/га}$$

Загальний ефект за 1 рік

$$E_{\text{заг}} = 7000 + 1600 = 8600 \text{ грн/га}$$

Витрати на біовугілля:

$$C_{\text{біо}} = 5 \text{ т} \cdot 8000 + 5000 = 45\,000 \text{ грн/га}$$

Чистий прибуток за 5 років

$$E_5 = 8600 \cdot 5 = 43\,000 \text{ грн/га}$$

$$П_5 = 43\,000 - 45\,000 = -2\,000 \text{ грн/га}$$

Висновок: при купівлі дорогого біовугілля економічний ефект є низьким або нульовим.

Розрахунок економічної ефективності (Сценарій 2: локальне виробництво)

У Братишеві є доступ до деревної та аграрної біомаси, що дозволяє організувати локальне виробництво біовугілля. У цьому разі собівартість може становити 5000 грн/т.

1. Витрати на біовугілля

$$C_{\text{біо}} = 5 \text{ т} \cdot 5000 + 5000 = 30\,000 \text{ грн/га}$$

2. Додатковий економічний ефект

(урожайність і економія добрив такі ж, як у сценарії 1)

$$E_5 = 8600 \cdot 5 = 43\,000 \text{ грн/га}$$

3. Чистий додатковий прибуток

$$П_5 = 43\,000 - 30\,000 = 13\,000 \text{ грн/га}$$

4. Рентабельність

$$R = \frac{13\,000}{30\,000} \cdot 100\% \approx 43,3\%$$

5. Термін окупності

$$T_{\text{ок}} = \frac{30\,000}{8600} \approx 3,5 \text{ року}$$

Таблиця 3.5. Порівняльний аналіз сценаріїв

Показник	Сценарій 1 (купівля)	Сценарій 2 (локальне виробництво)
Витрати, грн/га	45 000	30 000
Дод. ефект за 5 років, грн/га	43 000	43 000
Чистий прибуток, грн/га	-2 000	+13 000
Рентабельність	низька	висока
Термін окупності	>5 років	~3,5 року
Загальний висновок	економічно недоцільно	економічно доцільно

З аналізу видно, що ключовим чинником є саме спосіб отримання біовугілля. Власне виробництво дозволяє знизити собівартість на 30–40 %, що робить технологію прибутковою вже у середньостроковій перспективі.

З проведеного аналізу видно, що вирішальним чинником економічної ефективності технології є спосіб отримання біовугілля. Саме організація власного виробництва біовугілля забезпечує зниження його собівартості в

середньому на 30–40 %, що істотно змінює фінансову модель проєкту. За таких умов технологія стає не лише самодостатньою, а й прибутковою вже у середньостроковій перспективі (3–5 років), оскільки:

- зменшуються витрати на закупівлю готового біовугілля на ринку;
- з'являється можливість використовувати місцеву біомасу як дешеву сировину;
- підвищується гнучкість виробничого циклу та стабільність постачання;
- утворюється додана вартість, яка може бути реалізована у вигляді продажу надлишків продукції або послуг рекультивації ґрунтів із застосуванням біовугілля.

Більше того, створення локального виробничого майданчика відкриває додаткові можливості для масштабування — розширення спектра біопродуктів, підвищення зайнятості та інтеграції в регіональні програми сталого землекористування. У довгостроковій перспективі це формує передумови для розвитку замкненого циклу біотехнологій, що зменшує екологічні ризики та підвищує стійкість місцевих екосистем.

7. Екологічні та соціально-економічні переваги для Братишева

Окрім прямого фінансового ефекту, використання біовугілля створює такі додаткові вигоди:

Покращення екологічного стану ґрунтів — підвищення вмісту органічної речовини, зниження ризику кислотності та ерозії.

Довготривала фіксація вуглецю — зменшення викидів парникових газів і можливість участі у програмах “carbon farming”.

Раціональне використання місцевої біомаси — утилізація рослинних решток та гілля, зменшення випадків їх спалювання.

Створення локальних робочих місць у разі організації міні-лінії з виробництва біовугілля.

Підвищення стійкості агросистеми до кліматичних змін — краща водоутримувальна здатність ґрунту та зниження потреби в добривах.

Економічний аналіз показує, що впровадження біовугілля в аграрні господарства с. Братишів є перспективним напрямом підвищення продуктивності ґрунтів і забезпечення сталого землеробства. При купівлі готового біовугілля економічна ефективність є низькою через високу собівартість. Натомість організація локального виробництва з використанням місцевої біомаси показує рентабельність понад 40 % та термін окупності близько 3–4 років.

Таким чином, для Братишева доцільно розглядати модель створення місцевого виробничого майданчика з переробки агровідходів у біовугілля, що забезпечить як економічні, так і екологічні переваги для громади.

3.4. Екологічні ризики та обмеження застосування біовугілля

Застосування біовугілля в селі Братишів супроводжується низкою екологічних ризиків та обмежень, що зумовлені як природно-географічними особливостями території, так і характером самого матеріалу. Братишів розташований у межах пагорбистого рельєфу з численними схилами, які безпосередньо спускаються у напрямку Дністровського каньйону. Така морфологія місцевості формує підвищений рівень ерозійної небезпеки, що значно впливає на поведінку будь-яких мінеральних та органічних матеріалів, внесених у ґрунт. У контексті біовугілля це особливо важливо, оскільки матеріал має низьку щільність, високу дисперсність і здатність до міграції під дією вітру та води, що створює потенційні ризики перенесення частинок за межі ділянок внесення.

Одним з найістотніших екологічних ризиків є ймовірність надходження забруднювачів разом із біовугіллям у випадку, якщо процес його виробництва не контролюється належним чином. Якість біовугілля залежить від вихідної біомаси — деревини, соломи, рослинних решток, відходів сільського господарства або навіть змішаних відходів. Використання сировини, забрудненої важкими металами (свинець, кадмій, мідь, цинк), органічними токсикантами або залишками агрохімікатів, може призвести до потрапляння цих речовин у готовий продукт. У такому разі внесення неконтрольованого біовугілля в ґрунт створює додаткове екотоксикологічне навантаження і може стати джерелом хронічного забруднення, яке з часом поширюється на ґрунтові води, а з огляду на рельєф Братишева — також і на поверхневі води, що стікають у бік Дністра. Окрім того, технологія піролізу, яка передбачає нагрівання біомаси без доступу кисню, може супроводжуватися викидами летких органічних сполук, поліциклічних ароматичних вуглеводнів, оксидів азоту та дрібнодисперсного пилу. У приватних господарствах, коли виробництво біовугілля здійснюється малими, часто кустарними установками без систем очищення, ці викиди можуть погіршувати якість повітря в межах села.

Серйозним екологічним аспектом є також вплив біовугілля на хімічні властивості ґрунтів. Більшість видів цього матеріалу мають виражену лужну реакцію, що зумовлюється високим вмістом кальцію, магнію, калію та інших мінеральних компонентів. У селі Братишів частина орних земель характеризується близькою до нейтральної кислотністю, тому істотне підлужнення унаслідок надмірного внесення біовугілля може спричинити дисбаланс у живленні рослин. Зокрема, при підвищенні рН знижується рухомість і доступність мікроелементів, таких як залізо, марганець і цинк, що може призводити до фізіологічних порушень, зокрема хлорозу. Окрім того, зміна кислотно-лужної рівноваги може впливати на поведінку важких

металів, сприяючи їх фіксації або, навпаки, мобілізації залежно від конкретних мікроекологічних умов.

Біовугілля здатне істотно змінювати структуру ґрунтової біоти — від мікроорганізмів до ґрунтових безхребетних. З одного боку, висока пористість і розвинена поверхня частинок біовугілля створюють сприятливе середовище для розвитку корисної мікрофлори, що в перспективі може покращувати структуру ґрунту й підсилювати його родючість. З іншого боку, внесення надмірних доз або використання матеріалу з невідповідними фізико-хімічними характеристиками може порушити природний баланс біоти, особливо в ґрунтах, де домінувало органічне удобрення натурального походження, як це традиційно характерно для Братишева. Різка зміна умов може пригнічувати окремі види мікроорганізмів, змінювати співвідношення груп (бактерії/гриби), впливати на активність ферментних систем і, відповідно, на процеси мінералізації органічної речовини.

Особливу увагу слід приділити здатності біовугілля до міграції. Через свою легку структуру воно легко переноситься потоками дощових вод, що на схилах Братишева може спричиняти інтенсивний змив дрібних частинок із полів. У разі, якщо біовугілля адсорбує забруднювачі, навіть у низьких концентраціях, це створює вкрай небезпечний канал перенесення токсичних сполук у поверхневі води та водні екосистеми Дністра. Міграція частинок можлива й за умов сильних вітрів, що характерно для відкритих ділянок навколо села. Така поведінка матеріалу може призвести до його накопичення у пониженнях рельєфу, уздовж придорожніх канав або у водозбірних зонах, де він може впливати на локальні ґрунтові умови безконтрольно.

Економічні й організаційні обмеження також відіграють важливу роль. Виробництво або придбання якісного сертифікованого біовугілля є дорогим, а створення повноцінної системи контролю — ще дорожчим. Для невеликого населеного пункту необхідність мати лабораторний аналіз для кожної партії

біовугілля, моніторинг ґрунтів до і після внесення, а також контроль за можливими змінами якості вод є суттєвим фінансовим та логістичним навантаженням. Додатковою проблемою є відсутність на рівні громад і сільських господарств чітких інструкцій і нормативів щодо норм внесення біовугілля для конкретних типів ґрунтів, кліматичних умов і культур. Це створює ситуацію, коли фермери змушені покладатися на власний досвід або загальні рекомендації, які не завжди враховують локальні екологічні особливості. У контексті Братишева важливим є ще один аспект — взаємодія біовугілля з протиерозійними заходами. Хоча в довгостроковій перспективі біовугілля здатне поліпшувати агрегатну структуру ґрунту і зменшувати ерозію, у перші роки після внесення частинки можуть залишатися нестійкими та піддаватися змиву. За відсутності мульчування, покривних культур, терасування або смугового землеробства ризики втрати матеріалу й ерозії ґрунту особливо зростають. Це має важливе значення для запобігання забрудненню водних ресурсів та деградації земель.

Підсумовуючи, застосування біовугілля в селі Братишів має значний потенціал для покращення властивостей ґрунтів, проте супроводжується низкою екологічних ризиків, серед яких найбільш критичними є ймовірність внесення забруднювачів разом із неякісним біовугіллям, зміна кислотності та хімічної рівноваги ґрунтів, можливе порушення діяльності ґрунтової біоти, а також висока ймовірність міграції частинок на схилах, що може призводити до забруднення водних екосистем Дністровського каньйону. Економічні та організаційні обмеження — такі як висока вартість виробництва, потреба у лабораторному контролі та недостатність нормативного регулювання — також обмежують можливість широкого впровадження технології в громаді. Тому використання біовугілля в Братишеві можливе лише за умови ретельного дотримання екологічних вимог, попереднього аналізу матеріалу, врахування особливостей рельєфу та впровадження заходів, що

запобігатимуть ерозії та міграції частинок. Це дозволить мінімізувати ризики і забезпечити безпечне та ефективне застосування біовугілля у місцевих агроекосистемах.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Забезпечення охорони праці під час виконання експериментальної частини магістерської роботи, присвяченої оцінці ефективності застосування біовугілля для відновлення деградованих ґрунтів, є складовою організації наукових досліджень та обов'язковою вимогою відповідно до законодавства України. Експериментальні роботи включали поєднання польових та лабораторних етапів, що зумовлює комплексність заходів безпеки, оскільки дослідник взаємодіє з різними групами потенційно небезпечних і шкідливих факторів природного, техногенного, хімічного та мікробіологічного походження. Польові дослідження проводилися на території села Братишів і міста Тлумач, які характеризуються наявністю деградованих ґрунтів, фізично нестабільного рельєфу та різноманітних форм антропогенного впливу. Лабораторні роботи здійснювалися з використанням сучасного приладового комплексу, хімічних реактивів, спеціалізованого обладнання для визначення фізико-хімічних властивостей ґрунтів і біовугілля, що вимагає дотримання правил техніки безпеки, електробезпеки, пожежної безпеки та санітарно-гігієнічних норм [12, 19]..

Відповідно до Закону України «Про охорону праці» кожен працівник або здобувач освіти, який виконує роботи з підвищеним ризиком, повинен бути забезпечений безпечними умовами праці, пройти відповідний інструктаж, володіти інформацією про можливі небезпеки та методи запобігання їхньому впливу. Роботи з ґрунтами, особливо деградованими, належать до категорій, де можливий контакт з мікробіологічно небезпечними об'єктами, хімічними сполуками природного та техногенного походження, а також наявні ризики механічних травм унаслідок роботи на складному рельєфі. Лабораторні дослідження включають контакт з дрібнодисперсним

біовугіллям, роботу з високотемпературними приладами, електрообладнанням, кислотами, лугами, солями металів та іншими реактивами, що за недотримання правил може спричинити травмування, опіки або отруєння [27, 37].

Організація польових робіт у с. Братишів і м. Тлумач потребує врахування особливостей території, зокрема структури рельєфу, характеру деградаційних процесів, сезонних кліматичних факторів і рівня антропогенного навантаження. Ґрунти цих територій нерідко мають підвищену засміченість, можуть містити фрагменти скла, металу, залишки агрохімікатів, органічних забруднювачів і частинки техногенного походження. Крім того, деградовані землі характеризуються нестабільною поверхнею, а на схилах можливе раптове зрушення ґрунту. Дослідник повинен пересуватися обережно, вибираючи шляхи руху з найменшим ухилом, уникати зон підтоплення, заболочення або ділянок із пухким ґрунтом. Особливої уваги потребують території з ярковою ерозією, де рух ґрунтових мас може бути непередбачуваним [22, 36].

Під час польових робіт важливо використовувати відповідний захисний одяг та спеціалізоване взуття із протиковзкою підошвою. Руки повинні бути захищені щільними рукавицями, оскільки в ґрунті можуть траплятися гострі предмети або корозійні матеріали. Захист очей є обов'язковим при роботі у вітряну погоду, коли пил і дрібні частинки ґрунту можуть потрапляти на слизові оболонки. Дослідник повинен мати аптечку першої допомоги, засоби зв'язку та бути проінформованим щодо найближчих медичних пунктів і шляхів евакуації з території у разі травмування або погіршення погодних умов. Забороняється здійснювати польові роботи під час грози, сильного вітру, зливи або туману, що обмежують оглядовість.

Важливим аспектом забезпечення охорони праці у польових умовах є попередній аналіз екологічної ситуації території, оскільки деградовані ґрунти можуть містити підвищені концентрації важких металів, залишків нафтопродуктів, пестицидів або продуктів техногенної діяльності. Контакт з такими компонентами потребує обережності. Після завершення роботи необхідно ретельно мити руки, дезінфікувати інструменти, а одяг, який контактував із ґрунтом, повинен бути випраний окремо. Проби ґрунту транспортують у герметичних контейнерах, які запобігають витоку, змішуванню зразків чи потраплянню частинок у навколишнє середовище [18, 37].

У лабораторних умовах дослідник взаємодіє з низкою небезпечних факторів, що потребують суворого дотримання правил безпеки. Перед початком роботи він повинен пройти первинний інструктаж, бути ознайомленим із планом евакуації, місцями розташування вогнегасників та аптечок, знати основні алгоритми дій у разі пожежі, хімічного ураження або травмування. Організація робочого місця передбачає наявність чіткого порядку, достатнього освітлення, вентиляції та справності лабораторного обладнання. Прилади, що працюють від електромережі, повинні мати відповідне заземлення, захисні кожухи та перебувати у належному технічному стані, що відповідає вимогам НПАОП [17, 34].

Особливої уваги потребує робота з біовугіллям, яке є дрібнодисперсним і може легко переходити у зважений стан у повітрі. Пил біовугілля становить небезпеку для органів дихання, викликає подразнення слизових оболонок та очей, а при тривалому вдиханні може негативно впливати на дихальну систему. Тому всі маніпуляції з біовугіллям — подрібнення, просіювання, змішування або зважування — повинні проводитися під витяжною шафою або у місцях із локальною вентиляцією. Використання респіратора класу захисту FFP2 або FFP3, захисних окулярів і

рукавиць є обов'язковим. Після завершення маніпуляцій необхідно виконувати вологе прибирання робочої поверхні, щоб запобігти повторному підняттю пилу у повітря. Недопустимо торкатися руками очей, обличчя або ротової порожнини під час роботи з біовугіллям [42, 48].

Лабораторні дослідження з ґрунтами передбачають контакт із потенційно забрудненими зразками, які містять підвищену кількість мікроорганізмів або токсичних речовин. Обробка таких проб проводиться у рукавицях, а поверхня, що контактує зі зразком, після завершення роботи дезінфікується. Приготування витяжок ґрунту, екстрагування металів або реакцій з використанням кислот чи лугів проводиться під витяжною шафою. Реактиви повинні зберігатися у спеціально відведених місцях, бути маркованими, а робочі розчини — приготованими згідно з інструкціями. Змішування кислот із водою виконується шляхом додавання кислоти у воду, а не навпаки, що запобігає утворенню бризок та інтенсивному виділенню тепла [17, 39].

Робота з високотемпературним обладнанням — сушильною шафою та муфельною піччю — потребує особливої уваги, оскільки ризик отримання термічного опіку є високим. Прилади включаються лише після перевірки цілісності кабелів та правильності встановлення температурних режимів. Завантаження та вивантаження зразків дозволено здійснювати лише після стабілізації температури і за допомогою спеціальних термостійких рукавиць. Заборонено торкатися внутрішніх поверхонь приладів, залишати їх увімкненими без нагляду або розміщувати поблизу легкозаймисті матеріали [19, 24, 47].

Пожежна безпека у лабораторії регламентується вимогами ДБН та НПАОП, відповідно до яких приміщення повинні бути оснащені первинними засобами пожежогасіння, мати вільні евакуаційні виходи та справну систему вентиляції. Під час проведення досліджень із біовугіллям слід враховувати,

що це матеріал, який може займатися при контакті з відкритим полум'ям або іскрою, тому зберігати його необхідно у закритих ємностях, подалі від нагрівальних елементів. Категорично заборонено використовувати відкритий вогонь, курити у лабораторії або зберігати поблизу термоприладів спиртовмісні розчини. У разі виникнення загоряння необхідно негайно від'єднати прилади від електромережі, повідомити відповідальних осіб та, при можливості, використати вогнегасник відповідного класу без нараження себе на небезпеку [21, 29].

Важливою складовою системи охорони праці під час виконання наукових досліджень є правильне поводження з усіма видами відходів, що утворюються у процесі експериментальної роботи. До таких відходів належать залишки біовугілля, ґрунтові проби, використані або прострочені реактиви, фільтрувальні матеріали, забруднені рукавички, серветки та інші лабораторні витратні матеріали. Усі вони повинні сортуватися та збиратися у відповідні контейнери згідно з вимогами чинних нормативних документів (ДСТУ, Правила поводження з хімічними речовинами). Особливо суворих вимог потребують небезпечні хімічні відходи, які належать до категорій токсичних, корозійних, легкозаймистих або хімічно нестабільних речовин.

Залишки хімічних реактивів категорично заборонено виливати у каналізацію без попередньої нейтралізації чи детоксикації, оскільки це може створювати загрозу для водних екосистем і обладнання очисних споруд. Нейтралізація має проводитися відповідно до методичних рекомендацій та під контролем відповідального працівника лабораторії. Забруднене лабораторне скло (піпетки, пробірки, шприци, скляні капіляри) збирається у спеціальну ударостійку тару для гострих предметів, яка запобігає порізам і потраплянню небезпечних речовин на шкіру чи в дихальні шляхи. Важливою умовою безпечної роботи є заборона змішування несумісних відходів, адже реакція кислот із лугами, окисників із органічними речовинами або металами,

а також змішування розчинників із реактивами різної хімічної природи може спричинити раптове виділення тепла, утворення вибухонебезпечних газів чи токсичних випарів. Тому кожна група відходів повинна маркуватися і зберігатися окремо, з урахуванням вимог хімічної сумісності. Психофізіологічні аспекти охорони праці відіграють не менш важливу роль у забезпеченні безпеки дослідника. Лабораторні та польові роботи потребують високої концентрації уваги, точності рухів і здатності швидко реагувати на зміну умов експерименту. Тому оптимізація робочого режиму включає дотримання раціонального розподілу робочого часу та відпочинку, недопущення перенавантаження, як фізичного, так і розумового, виконання робіт лише у стані повної працездатності, заборону роботи під впливом медикаментів чи речовин, що знижують увагу або уповільнюють реакцію, а також регулярний контроль самопочуття під час роботи. Дослідник повинен уміти оперативно оцінювати власний стан, а при появі ознак запаморочення, нудоти, порушення координації чи інших симптомів негайно припинити виконання завдання, оскільки такі прояви можуть бути сигналом впливу токсичних речовин, перегріву, гіпоксії або перевтоми.

У комплексі всі зазначені заходи охорони праці забезпечують високу культуру безпеки в процесі виконання експериментальної частини магістерської роботи. Вони дозволяють мінімізувати ризики травмування, хімічного ураження, психофізіологічного виснаження та інших небезпечних ситуацій. Крім того, дотримання вимог охорони праці сприяє підвищенню достовірності, відтворюваності та якості отриманих експериментальних результатів, що є однією з ключових умов успішного виконання наукової роботи на високому професійному рівні.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження дозволило комплексно оцінити ефективність застосування біовугілля як інноваційного та екологічно безпечного меліоранта для відновлення деградованих ґрунтів. Актуальність цієї роботи визначається тим, що ґрунтовий покрив України зазнає багаторівневих змін під впливом інтенсивного землеробства, техногенного навантаження, змін клімату, надмірної кислотності, забруднення важкими металами та органічними токсикантами, а також значних руйнувань і порушення екосистемних процесів, спричинених воєнними діями. У сучасних умовах збереження та відновлення ґрунтових ресурсів є критично важливою передумовою продовольчої безпеки, стійкості агроландшафтів та підтримання біогеохімічного балансу природних систем. З огляду на це вивчення властивостей і практичного потенціалу біовугілля є науково обґрунтованим і соціально необхідним завданням.

Отримані результати підтверджують, що біовугілля має багатокомпонентний механізм дії, який одночасно охоплює фізичні, хімічні, біологічні та біогеохімічні процеси. Доведено, що внесення біовугілля змінює структурний стан ґрунтів, зменшує їх ущільнення, підвищує пористість, покращує аерацію та водопроникність. У деградованих та природно малородючих ґрунтах спостерігається зростання водоутримувальної здатності, підвищення стійкості агрегатів та зниження ризиків ерозійних процесів. Завдяки своїй пористій структурі біовугілля сприяє покращенню циркуляції повітря й води, що створює оптимальні умови для росту кореневих систем, розвитку ґрунтової біоти і підтримання рівномірного водного режиму, особливо в умовах кліматичних коливань.

Хімічний вплив біовугілля проявився в поступовому підвищенні кислотно-лужної рівноваги кислих ґрунтів, покращенні катіонно-обмінної

здатності та буферності. Встановлено, що біовугілля утримує в ґрунті такі елементи, як кальцій, магній, калій і фосфор, зменшуючи їх вимивання, а також сприяє поступовому вивільненню цих поживних компонентів. Особливо важливо, що біовугілля знижує рухомість токсичних елементів, у тому числі свинцю, кадмію, цинку, нікелю та міді, що є важливим для територій, які піддавалися техногенному забрудненню чи впливу вибухових навантажень. У результаті застосування біовугілля відбувається стабілізація забруднювачів у менш рухливих і менш токсичних формах, що зменшує їхнє надходження у рослинні тканини і, відповідно, в харчовий ланцюг.

Біологічний вплив біовугілля є одним із найвагоміших. Пориста структура матеріалу створює мікроніші для розвитку корисних мікроорганізмів, таких як азотофіксатори, фосфатмобілізатори, мікоризні гриби та сапротрофи. Після внесення біовугілля спостерігалось збільшення чисельності мікроорганізмів, підвищення ферментативної активності, зокрема уреаз, каталази, фосфатази, та посилення мінералізаційно-гуміфікаційних процесів. У деградованих ґрунтах, де мікробні угруповання перебували у пригніченому стані, внесення біовугілля сприяло відновленню біологічної активності та формуванню більш стабільного мікробного консорціуму, що є основою для довготривалого відновлення ґрунтової родючості. Таким чином, біовугілля виступає природним біостимулятором, що поліпшує умови життєдіяльності ґрунтових організмів.

Важливою частиною дослідження було встановлення впливу біовугілля на ґрунти досліджуваної території, які характеризуються комплексом деградаційних ознак: ерозією, дегуміфікацією, ущільненням, підкисленням, частковим засоленням, порушенням структури та локальним техногенним забрудненням. Доведено, що такі ґрунти найбільш відчутно реагують на внесення біовугілля. Вміст гумусу після застосування біовугілля зростає завдяки стабілізації органічної речовини і формуванню стійких

органомінеральних комплексів. Зростає ступінь насичення основами, зменшується гідролітична кислотність і підвищується здатність ґрунту утримувати поживні елементи. На ґрунтах із підвищеним рівнем забруднення важкими металами було зафіксовано зниження їхньої доступності для рослин, що підтверджує еколого-захисний потенціал біовугілля.

Експериментальні результати засвідчили позитивний вплив біовугілля на продуктивність рослин, зростання біомаси, покращення стійкості до стресових умов та підвищення доступності елементів живлення. Це відкриває перспективи застосування біовугілля у системах фітореMediaції, зокрема у поєднанні з енергокультурами. Використання біовугілля як компонента фітореMediaційних технологій дозволяє одночасно проводити очищення ґрунтів і формувати значний обсяг біомаси, що є ресурсною базою для подальшої переробки та виробництва енергії. Такий підхід відповідає концепції циркулярної економіки, де відходи перетворюються на цінний ресурс.

Економічний аналіз показав, що застосування біовугілля є економічно доцільним, оскільки забезпечує підвищення врожайності, зменшення потреби у мінеральних добривах, покращення якості продукції та загальне підвищення ефективності агровиробництва. З урахуванням можливостей участі у програмах скорочення викидів парникових газів, а також у міжнародних системах сертифікації вуглецевих видалень, застосування біовугілля може приносити додаткову економічну вигоду. Довготривалий ефект, який зберігається десятиліттями, робить біовугілля інвестиційно привабливим природоорієнтованим рішенням.

Узагальнюючи результати роботи, можна стверджувати, що біовугілля є універсальним екологічним продуктом, здатним вирішувати ключові проблеми сучасного землекористування: покращувати фізико-хімічні властивості ґрунту, відновлювати біологічну активність, знижувати

токсичність техногенно забруднених територій, сприяти акумулюванню стабільного вуглецю, зменшувати викиди парникових газів і підвищувати адаптивність агроecosистем до кліматичних змін. Біовугілля можна розглядати як стратегічний інструмент екологічної реабілітації ґрунтів та «зеленої» трансформації агросектора України.

Проведене дослідження підтверджує, що за умов дотримання технології виробництва та раціональних норм внесення біовугілля забезпечує довгострокове підвищення родючості, екологічної безпеки ґрунтів та їх відновлювальної здатності. Застосування біовугілля у програмах рекультивації, органічного землеробства, фіторе mediaції, управління відходами та кліматично орієнтованого господарювання є перспективним напрямом, який має бути інтегрований у державні та регіональні стратегії відновлення ґрунтових ресурсів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Lehmann J., Joseph S. (Eds.) Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. – 2nd ed. – London : Routledge, 2015. – 976 p. [Taylor & Francis](#)
2. Jeffery S., Verheijen F. G. A., Van der Velde M., Bastos A. C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis // Agriculture, Ecosystems & Environment. – 2011. – Vol. 144, No. 1. – P. 175–187. [ScienceDirect](#)
3. Kabir E., Kim K.-H., Kwon E. E. Biochar as a tool for the improvement of soil and environment // Frontiers in Environmental Science. – 2023. – Vol. 11. – Article 1324533. [Frontiers](#)
4. Premalatha R. P., Selvakumar G., Harsh V. et al. A review on biochar's effect on soil properties and crop productivity // Frontiers in Energy Research. – 2023. – Vol. 11. – Article 1092637. [Frontiers](#)
5. Dimitriadou S., Karyotis Th., Paranychianakis N. et al. Revitalizing degraded soils: the role of biochar in enhancing soil quality and crop productivity // Environments. – 2025. – Vol. 12, No. 9. – Article 324. [MDPI+1](#)
6. Qi S., Degen A., Wang W. et al. Systemic review for the use of biochar to mitigate soil degradation // GCB Bioenergy. – 2024. – Vol. 16, No. 6. – e13147. [Wiley Online Library](#)
7. Nguyen T. B., Nguyen T. T., Nguyen H. T. et al. Biochar for soil remediation: a comprehensive review of mechanisms and applications // Environmental Pollution. – 2023. – Vol. 323. – 121230. [ScienceDirect](#)
8. Xu L., Li R., Zhang Y. et al. A comprehensive review of the application and potential toxicity of crop straw biochar in heavy metal-contaminated soils // Toxics. – 2025. – Vol. 13, No. 2. – Article 69. [MDPI](#)

9. Ola A. F., Adejumo S. A., Oyeleke O. G. et al. A review on biochar-based restoration of degraded soils through effective preparation and application // *International Journal of Plant & Soil Science*. – 2025. – Vol. 37, No. 6. – P. 1–20. [ResearchGate+1](#)
10. Barbosa F. L. A., Silva R. F., Pereira J. S. et al. Potential of biochar to restoration of microbial biomass and enzymatic activity in a highly degraded semiarid soil // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14. – Article 77368. [Nature](#)
11. Chen Q., Wang Y., Zhao X. et al. Remediation of soil contaminated by heavy metals using biochar: a review // *Polish Journal of Environmental Studies*. – 2022. – Vol. 31, No. 3. – P. 1–13. [pjoes.com](#)
12. Nguyen T. T., Kim M.-S., Lee S.-H. Biochar for heavy metal cleanup in soil and water: a review // *Journal of Hazardous Materials*. – 2024. – Vol. 459. – 133912. [ResearchGate](#)
13. Boorboori M. R., Jalili B., Pourakbar M. et al. Biochar; an effective factor in improving phytoremediation of contaminated soils // *Frontiers in Environmental Science*. – 2023. – Vol. 11. – Article 1253144. [Frontiers](#)
14. Das N., Ghosh S., Sarkar B. et al. Biochar-driven rhizoremediation of soil contaminated with organic pollutants: a review // *Circular Agricultural Systems*. – 2025. – Vol. 5. – Article 491. [SpringerLink+1](#)
15. Rashid M. S., Khan M., Islam M. et al. A critical review on biochar-assisted free radicals mediated redox reactions influencing transformation of potentially toxic metals // *Environmental Pollution*. – 2022. – Vol. 312. – 119947. [ScienceDirect](#)
16. Li J., Wang X., Liu Y. et al. Beneficial effects of biochar on overall soil quality and plant performance: a review // *Journal of Integrative Agriculture*. – 2025. – Vol. 24, No. 2. – P. 335–352. [ScienceDirect](#)

17. Kabir E., Kim K.-H., Szulejko J. E. Biochar-driven soil restoration: balancing carbon sequestration and soil health // European Journal of Soil Science. – 2025. – Early view. – 1–20. bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com
18. Sudarsan J. S., Goel M., Jahangiri H. et al. Sustainable food waste management: a critical review on biochar production and applications // Sustainable Food Technology. – 2025. – In press. shura.shu.ac.uk
19. Kabir E., Kwon E. E., Kim K.-H. Biochar in soil restoration: a comprehensive review on enhancing soil health and carbon sequestration // Microbiology Research Journal International. – 2024. – Vol. 34, No. 6. – P. 45–65. microjournal.researchfloor.org
20. Premalatha R. P., Selvakumar G. Review of the effects of biochar amendment on soil physical, chemical and biological properties // Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste. – 2022. – Vol. 26, No. 3. – 04022028. ascelibrary.org
21. Lehmann J., Joseph S. Biochar for environmental management: an introduction // In: Lehmann J., Joseph S. (Eds.). Biochar for Environmental Management: Science and Technology. – London : Earthscan, 2009. – P. 1–12. [ResearchGate+1](https://www.researchgate.net/publication/228211111)
22. Vakhnyak V. V. The role of restoring degraded soils in ensuring food security in the agro-industrial complex // Science Horizon. – 2025. – Vol. 28, No. 2. – P. 85–95. [sciencehorizon.com.ua+1](https://sciencehorizon.com.ua/)
23. Чайка Т. О. Напрями та технології відтворення родючості ґрунтів в умовах зміни клімату // Агробіологія. – 2023. – № 1. – С. 140–152. agrobiologiya.btsau.edu.ua
24. Нурмухаммедов А. К. Застосування біочару як інноваційного меліоранта ґрунтів // Біоенергетика. – 2022. – № 2. – С. 45–54. be.bio.gov.ua
25. Мандро Ю. Н. Перспективи застосування деревного вугілля (біочару) як засобу поліпшення стану лісових екосистем в умовах радіоактивного

- забруднення // Науковий вісник НЛТУ України. – 2020. – Т. 30, № 5. – С. 97–104. nv.nltu.edu.ua
26. Войтків А. Біовугілля як засіб підвищення родючості ґрунтів: огляд сучасних досліджень : курсова робота. – Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2024. – 32 с. [Біологічний факультет](#)
27. Федосов Я. С., Федосова О. І. Вплив біопрепарату та органо-мінерального добрива на продуктивність кукурудзи за використання біовугілля Biochar Aktive // Науковий вісник МНАУ. – 2024. – № 2. – С. 45–53. dspace.mnau.edu.ua
28. Улянич О. І., Демченко Н. О. Вплив органо-мінеральних та біологічних добрив на агроекологічний стан ріллі // Агроекологія. – 2023. – № 3. – С. 25–34. journalagroeco.org.ua
29. Чайка Т. О., ін. Напрями та технології відтворення родючості ґрунтів в Україні: роль біовугілля // Матеріали конф. «Напрями відтворення родючості ґрунтів в Україні». – Біла Церква, 2023. – С. 45–49. agrobiologiya.btsau.edu.ua
30. Біочар (вугілля) [Електронний ресурс] // Вікіпедія : вільна енциклопедія. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Біочар_\(вугілля\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Біочар_(вугілля)) (дата звернення: 22.11.2025). [Вікіпедія+1](#)
31. Біологічне вугілля – як еко-фактор збільшення родючості ґрунту [Електронний ресурс] // Agronom.com.ua. – 28.03.2018. – Режим доступу: <https://www.agronom.com.ua/biologichne-vugillya-yak-eko-faktor-zbilshennya-rodyuchosti-gruntu/> (дата звернення: 22.11.2025). [Агроном+1](#)
32. Біочар в сільському господарстві: рішення для сільського господарства, енергетики та екології [Електронний ресурс] // SuperAgronom.com. – 29.05.2025. – Режим доступу: <https://superagronom.com/articles/786-biochar--rishennya-dlya-silskogo-gospodarstva-energetiki-ta-ekologiyi> (дата звернення: 22.11.2025). [Superagronom.com+1](#)

33. Біочар – Словник агронома [Електронний ресурс] // SuperAgronom.com. – Режим доступу: <https://superagronom.com/slovník-agronoma/biochar-id20245> (дата звернення: 22.11.2025). [Superagronom.com](https://superagronom.com)
34. Використання біочару (біовугілля) у сільському господарстві [Електронний ресурс] // WeAgro.ua. – 19.05.2025. – Режим доступу: <https://weagro.ua/blog/vykorystannya-biocharu-biovugillya-u-silskomu-gospodarstvi/> (дата звернення: 22.11.2025). [WEAGRO+1](https://weagro.ua)
35. Використання біовугілля в сільському господарстві та тваринництві [Електронний ресурс] // Beston Group. – Режим доступу: <https://www.bestongroup.com/uk/industry-news/biochar-use-in-agriculture-and-farming/> (дата звернення: 22.11.2025). [Beston Group](https://www.bestongroup.com)
36. Біочар для агропромисловості [Електронний ресурс] // Wisent. – Режим доступу: <https://wisent-charcoal.com/agriculture> (дата звернення: 22.11.2025). [wisent-charcoal.com+1](https://wisent-charcoal.com)
37. БІОСНАР: панацея для агропромисловості ХХІ століття [Електронний ресурс] // Pyrolysis – виробництво комплексів безперервного піролізу. – Режим доступу: <https://pyrolysis.net/biochar-panaceja-XXI-stolittya/ua/1> (дата звернення: 22.11.2025). [Вінницька бібліотека](https://pyrolysis.net)
38. Що таке біовугілля або гідротермальна карбонізація біомаси? [Електронний ресурс] // Bio.ukr.bio. – Режим доступу: <https://bio.ukr.bio/ua/articles/6166/> (дата звернення: 22.11.2025). [Bio Ukraina](https://bio.ukr.bio)
39. Методи створення Terra Preta: активація біочару [Електронний ресурс] // Balyky.org. – Режим доступу: <https://www.balyky.org/методи-створення-терра-прета-актива/> (дата звернення: 22.11.2025). [balyky.org](https://www.balyky.org)
40. Екологічна оцінка застосування біовугілля як домішки у ґрунт [Електронний ресурс] // Матеріали наук. публ. (PDF). – Режим доступу: <https://scispace.com/pdf/ecological-assessment-of-the-application-of-biochar-as-an-2u9vh6e4.pdf> (дата звернення: 22.11.2025). [SciSpace](https://scispace.com)

41. Хохлов А. В., Гомеля М. Д., Хохлова Л. Й. Детоксикація важких металів у ґрунті застосуванням модифікованого біовугілля з рисового лушпиння // *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки.* – 2022. – Вип. 125. – С. 244–251. DOI: 10.32851/2226-0099.2022.125.33. [Ірбіс НБУВ+1](#)
42. Хохлов А. В., Хохлова Л. Й., Ковтун М. Ф. Екосорбент на основі рослинної сировини для детоксикації кадмію у ґрунтах // *Екологічні науки.* – 2023. – № 3(48). – С. 195–200. DOI: 10.32846/2306-9716/2023.есо.3-48.31. [Дослідження і розробки](#)
43. Мандро Ю. Н., Давидова І. В. Перспективи застосування деревного вугілля (біочару) як ефективного контрзаходу для радіоактивно забруднених і деградованих лісових екосистем // *Науковий вісник НЛТУ України (Scientific Bulletin of UNFU).* – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 92–98. DOI: 10.36930/40300416. [FAO AGRIS+2learn.ztu.edu.ua+2](#)
44. Khokhlov A. V., Khokhlova L. I. Modified rice husk biochar for binding Cd(II), Cu(II) ions in aqueous solutions // *Journal of Chemistry and Technologies.* – 2022. – Vol. 30, No. 4. – P. 659–666. DOI: 10.15421/jchemtech.v30i4.26817. [Дослідження і розробки](#)
45. Khokhlov A. V., Khokhlova L. I., Sych N. V. Using modified biochar from bagasse for removal heavy metal // *Journal of Chemistry and Technologies.* – 2022. – Vol. 30, No. 3. – P. 459–465. DOI: 10.15421/jchemtech.v30i3.262094. [chemistry.dnu.dp.ua+1](#)
46. Хохлов А. В., Хохлова Л. Й. Біосорбційні комплексні матеріали для детоксикації пестицидів у ґрунтах // *Таврійський науковий вісник.* – 2021. – № 119. – С. 281–288. [Дослідження і розробки](#)
47. Хохлов А. В., Хохлова Л. Й. Очищення піщаних ґрунтів від нафтозабруднень застосуванням біосорбційних комплексів // *Екологічні науки.* – 2020. – № 6(33). – С. 86–90. [Дослідження і розробки](#)

48. Хохлов А. В., Хохлова Л. Й., Титаренко М. В. Деструктивні властивості біосорбційних комплексів при знешкодженні пестицидів у ґрунтах // *Таврійський науковий вісник*. – 2018. – № 100, т. 2. – С. 325–330. [Дослідження і розробки](#)
49. Хохлов А. В., Хохлова Л. Й. Sulfur-containing biocarbon material of strong binding of heavy metals // *БГТУ (наукові праці)*. – 2019. – С. 159–162. (Матеріал присвячений біовуглецевому матеріалу для зв'язування важких металів у водних та ґрунтових середовищах.) [Дослідження і розробки](#)
50. Khokhlov A. V. Chemical-Physical Features of the biochar-based oil-destrutive sorbent // *Chemistry, Physics and Technology of Surface*. – 2023. – Vol. 14, №. 2. – P. 255–261. (Розглянуто біочар як основу для сорбенту деструктивного типу, придатного для очищення забруднених середовищ.)