

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ



**ГРИЦУЛЯК ГАЛИНА МИХАЙЛІВНА**

УДК 631.95:504.5:628.3:502.174:620.925:58

**ЕКОЛОГО-АГРОХІМІЧНА ОЦІНКА  
ЗАСТОСУВАННЯ ОСАДУ СТІЧНИХ ВОД ЯК ДОБРИВА ЗА  
ВИРОЩУВАННЯ ФІТОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР**

Спеціальність 03.00.16 –Екологія

Реферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора сільськогосподарських наук

Дніпро – 2024

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор сільськогосподарських наук, професор  
**Лопушняк Василь Іванович**,  
в.о. ректора Львівського національного університету природокористування

Офіційні опоненти: доктор біологічних наук, професор  
**Лихолат Юрій Васильович**,  
завідувач кафедри фізіології та інтродукції рослин  
Дніпровського національного університету імені  
Олеся Гончара

доктор сільськогосподарських наук, професор  
**Писаренко Павло Вікторович**,  
завідувач кафедри екології, збалансованого  
природокористування та захисту довкілля  
Полтавського державного аграрного університету

доктор сільськогосподарських наук, професор  
**Скрильник Євген Володимирович**,  
завідувач лабораторії органічних добрив і гумусу  
Національного наукового центру «Інститут  
грунтознавства та агрохімії О. Н. Соколовського»

Захист дисертації відбудеться 20 червня 2024 року о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.804.02 у Дніпровському державному аграрно-економічному університеті за адресою: 49600, вул. С. Єфремова, 25, м. Дніпро, Україна.

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

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,



Володимир КОЗЕЧКО

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Системні екологічні проблеми, які набули загрозливих масштабів впливу на глобальні зміни клімату, актуалізують необхідність пошуку відновлювальних джерел енергії, які б відзначалися нульовим або мінімальним балансом викидів вуглецю в атмосферу. Одним із перспективних напрямів розвитку відновлюваних джерел енергії, які характеризуються інтенсивним секвеструванням вуглецю в біомасі та органічній речовині ґрунтового покриву, є біоенергетика.

В Україні біоенергетика є одним зі стратегічних шляхів розвитку сектору відновлюваної енергетики, оскільки ґрунтово-кліматичні умови сприяють вирощуванню переважної більшості видів перспективних фітоенергетичних культур, зокрема: верби енергетичної (*Salix viminalis* L.), міскантуса (*Miscanthus x giganteus*), світчграсу (*Panicum virgatum* L.), сільфії пронизанолистої (*Silphium perfoliatum* L.) та топінамбура (*Helianthus tuberosus* L.). Крім отримання біомаси, вирощуванням таких культур на маргінальних ґрунтах можна створити умови для уповільнення процесів деградації та стабілізації екологічного стану ґрунтового покриву з подальшою його ревіталізацією, що сприяє стабілізації ґрунтових систем та покращанню їх основних фізико-хімічних, агротехнологічних та біоекологічних властивостей. Це, в свою чергу, зумовить підвищення стійкості агроєкосистем.

Володіючи високим потенціалом нагромадження фітомаси, енергетичні культури позитивно реагують на внесення добрив. З огляду на недостатню кількість органічних добрив для традиційного рослинництва, джерелами збільшення ресурсів органічної речовини у ґрунті під біоенергетичними культурами можуть слугувати нетрадиційні види органічної сировини, зокрема осад стічних вод (ОСВ).

Внесення ОСВ під біоенергетичні культури має значні перспективи і дозволяє вирішувати проблему утилізації нагромаджених значних його запасів у комунальних господарствах міст, а також сприяє забезпеченню рослин необхідними макро- і мікроелементами. Однак, цей сировинний ресурс може містити забруднюючі речовини та поллютанти. З огляду на це, важливо вивчити закономірності формування продуктивності біоенергетичних культур після внесення в різний спосіб осаду стічних вод, з урахуванням їхнього агроєкологічного впливу на екосистеми, з метою подальшого нарощування обсягів виробництва біомаси та стабілізації енергетичного балансу України.

Питання технологічних аспектів вирощування різних видів енергетичних культур в ґрунтово-кліматичних умовах України відображені в публікаціях О. М. Ганженка, 2019; М. Я. Гументика, 2017; С. М. Каленської, 2019; В. І. Кравчука, 2007; М. І. Кулика, 2020; Ю. В. Лихолата, 2022; М.М. Харитонова, 2009; Я. Д. Фучила, 2011; ефективність застосування осаду стічних вод та інших відходів як добрив в агрофітоценозах (в тому числі й на техногенних та забруднених ґрунтах) вивчали П. В. Писаренко, 2019; Є. В. Скрильник, 2018; А. І. Фатеев, 2016; М. Й. Шевчук, 2018 та інші. Однак питання застосування ОСВ як добрива саме під енергетичні культури в умовах деградованих дерново-підзолистих ґрунтів вивчені недостатньою мірою, що зумовило актуальність наукових досліджень за цією тематикою.

Запропоновані в дисертаційній роботі способи використання осаду стічних вод як добрива під фітоенергетичні культури знайшли усебічне наукове обґрунтування на основі оцінки результатів їхнього впливу на фізико-хімічні, біологічні та екологічні показники дерново-підзолистого ґрунту Передкарпаття.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження за темою дисертаційної роботи виконували відповідно до тематичних планів Львівського національного аграрного університету за комплексною науково-дослідною темою факультету агротехнологій та екології: «Розробка науково-обґрунтованих систем управління продуктивним потенціалом виробництва продукції рослинництва, ведення землеробства на основі екологостабілізуючих заходів з охорони ґрунтів в агрокліматичних зонах Західного регіону України» (№ ДР 0111U001253) – (2016 – 2019 рр.); «Підвищення рівня екологічної безпеки та продовження ресурсу експлуатації споруд нафтогазового комплексу» (№ ДР 0118 U006751) – (2018 – 2021 рр.); «Розроблення науково-практичних підходів та технологій захисту навколишнього середовища» (№ ДР 0121 U113388) – (2021– 2023 рр.); Ініціативних проєктів ГО «Екодія»: «Карпатські лісові школи: пілотне співробітництво для збереження природи та екологічної освіти» (2021 р.); «Відродження естетико-екологічних функцій малих водотоків р. Млинівки (Стебницької) та р. Радчанки на території Івано-Франківської МОТГ» за фінансової підтримки Федерального міністерства економіки та кліматичних дій Німеччини в рамках проєкту Міжнародної Кліматичної Ініціативи (ІКІ) “Посилення громадянського суспільства в реалізації національної кліматичної політики” (2023 р.).

**Мета і завдання дослідження.** Мета досліджень – встановити закономірності зміни екологічного стану дерново-підзолистого ґрунту та формування біомаси фітоценозів енергетичних культур у випадку внесення різних доз осаду стічних вод та компостів, виготовлених на його основі, з іншими органічними матеріалами, а також показати екологічну, енергетичну та економічну оцінки ефективності його застосування; оцінити перспективи використання осаду стічних вод у заходах ревіталізації нафтозабруднених ґрунтів.

Для досягнення поставленої мети вирішували такі завдання:

- визначити хімічний склад осаду стічних вод комунального господарства, розробити технології підготовки його до внесення у ґрунт як добрива та оцінити агрохімічні властивості порівняно з іншими нетрадиційними видами органічних добрив і екологічні ризики застосування;

- встановити вплив внесення осаду стічних вод і компостів, виготовлених на його основі, на агроекологічний стан дерново-підзолистого ґрунту в орному (0 – 20 см) і підорному (20 – 40 см) шарах, зокрема закономірності зміни фізико-хімічних властивостей, гумусового статусу та енергоємності гумусу, поживного режиму, біологічної активності, фітосанітарного забруднення та фітотоксичності;

- визначити закономірності зміни вмісту хімічних елементів (зокрема важких металів) у дерново-підзолистому ґрунті і їх міграції за профілем; особливості нагромадження їх міцнозв'язаних та рухомих форм під впливом унесення осаду стічних вод та компостів, виготовлених на його основі, а також біологічне поглинання і траслокацію в органах фітоенергетичних культур (вербі енергетичній, міскантусі, світчґрасі, сільфії пронизанолистій і топінамбурі) і показники

внутрішньо тканинного забруднення;

– виявити закономірності зміни біометричних показників вегетативної маси та особливості динаміки формування продуктивності енергетичних культур у випадку внесення різних доз осаду стічних вод та компостів, виготовлених на його основі, а також залежності біохімічного складу від зміни режиму мінерального живлення агрофітоценозів енергетичних культур;

- встановити ефективність запропонованих заходів ревіталізації ґрунтового покриву нафтозабруднених ґрунтів;

– оцінити екологічну, енергетичну та економічну ефективність застосування різних доз осаду стічних вод та компостів на його основі під енергетичні культури, а саме вербу енергетичну, міскантус, світчграс, сільфію пронизанолисту, топінамбур.

*Об'єкт дослідження* – геохімічні, фізико-хімічні та біологічні процеси, які характеризують зміну екологічного стану ґрунту, що зумовлює зміну продуктивності енергетичних культур, а саме верби енергетичної, міскантуса, світчграсу, сільфії пронизанолистої, топінамбура у разі внесення осаду стічних вод і компостів, виготовлених на його основі.

*Предмет дослідження* – геохімічні, фізико-хімічні, біологічні та екологічні показники дерново-підзолистого ґрунту у разі внесення осаду стічних вод як добрива, що впливають на рівень продуктивності агрофітоценозів, екологічну, енергетичну та економічну ефективність вирощування енергетичних культур.

**Методи дослідження.** Для досягнення поставленої мети та вирішення задач досліджень було застосовано такі методи: польовий – для визначення агрохімічної ефективності осаду стічних вод за вирощування фітоенергетичних культур на дерново-підзолистих ґрунтах; лабораторний: хімічний – для визначення хімічного складу ґрунту та вирощених на ньому фітоенергетичних культур; мікробіологічний – для оцінки стану мікробіологічного комплексу ґрунту; розрахунковий – для оцінки рівня продуктивності фітоенергетичних культур, економічної та енергетичної ефективності різних систем внесення добрив; статистичний – для оцінки рівня застосування добрив упродовж тривалого періоду та взаємодії факторів, що вивчалися в дослідженнях.

### **Наукова новизна одержаних результатів:**

Вперше встановлено еколого-агрохімічну ефективність застосування осаду стічних вод як добрива під фітоенергетичні культури, а також запропоновано вирішення проблеми екологічно безпечної його утилізації на дерново-підзолистих ґрунтах Передкарпаття за результатами комплексних ґрунтово-агрохімічних, мікробіологічних та агроекологічних досліджень, визначення показників продуктивності агроценозів, економічної та енергетичної ефективності; визначено шляхи ревіталізації нафтозабруднених ґрунтів з відновленням екологічних функцій ґрунтового покриву; встановлено основні закономірності міграції важких металів і токсичних сполук у ґрунті за внесення осаду стічних вод під фітоенергетичні культури; досліджено вплив застосування осаду стічних вод під енергетичні культури на агроекологічний стан дерново-підзолистого ґрунту, а саме, на зміну фізико-хімічних властивостей ґрунту та його поживного режиму, фітосанітарний стан та біологічну активність.

Удосконалено систему мінерального живлення фітоенергетичних культур з

урахуванням впливу осаду стічних вод та компостів, виготовлених на його основі, на еколого-агрохімічний стан і фітотоксичність дерново-підзолистого ґрунту, характер трансформації в ньому органічної речовини, динаміку вмісту гумусових сполук та секвестрацію вуглецю, зміну фракційно-групового складу гумусу та біологічної активності ґрунту; визначено вплив застосування осаду стічних вод на формування продуктивності агрофітоценозів, зокрема на зміну біометричних показників, а також динаміку нагромадження енергетичними культурами сирової і сухої речовини та зміну біохімічних показників вегетативної маси біоенергетичних культур;

Набуло подальшого розвитку вчення про особливості екологічно безпечної утилізації місцевих сировинних ресурсів як джерела органічної речовини у ґрунті з метою відновлення його екологічних функцій; удосконалено технологічні підходи стосовно підготовки до використання осаду стічних вод як добрива, оцінки їхнього елементного складу (в тому числі вмісту важких металів).

**Практичне значення одержаних результатів.** Досліджено хімічний склад осаду стічних вод і встановлено порівняно високий вміст органічної речовини і поживних речовин, що робить його придатним для використання як органічного добрива та основного складника матеріалу для виготовлення компостів.

Розроблено практичні рекомендації щодо використання осаду стічних вод у вигляді компостів з соломою для підвищення врожайності фітоенергетичних культур на дерново-підзолистих, глейових, середньосуглинкових ґрунтах. Доцільним є використання осаду стічних вод у дозі 40 т/га + N<sub>10</sub>P<sub>14</sub>K<sub>58</sub> безпосередньо з мулових карт очисних споруд під насадження фітоенергетичних культур. Однак, зважаючи на негативний екологічний вплив, більш ефективним буде використання компостів на його основі з додаванням соломи у дозі 30 т/га + N<sub>30</sub>K<sub>55</sub> для інтенсивнішого нагромадження сухої маси фітоенергетичних культур без виникнення небажаних наслідків, оскільки внесення компостів дозволяє зменшити вміст важких металів у дерново-підзолистому ґрунті порівняно з свіжим осадом стічних вод.

Основні результати наукових досліджень використовуються у навчально-виховному процесі під час викладання дисциплін «Агрохімія», «Хімія з основами біогеохімії», «Геохімія довкілля» для студентів II – IV курсів спеціальності 101-«Екологія» та для студентів спеціальності 201 - «Агрономія» Івано-Франківського коледжу Львівського національного аграрного університету (Івано-Франківський фаховий коледж Львівського національного університету природокористування довідка від 27.11.2019 р. № 01/5 – 302), а також, під час викладання вибіркового дисциплін «Рекультивация земель», «Енергетичні культури в альтернативній енергетиці» для здобувачів першого рівня вищої освіти (бакалавр) Івано – Франківського національного технічного університету нафти і газу для студентів спеціальності 183 – «Технології захисту навколишнього середовища» та впроваджено у виробництво на площі 57,2 га в ПП «Степан Мельничук» с. Турка Коломийського району Івано-Франківської області, де застосування компостів на основі осаду стічних вод забезпечило приріст врожайності верби енергетичної на 30,2 – 45,7 т/га порівняно з традиційною системою внесення добрив (акт від 10.12.2019 р.) (додаток А), впроваджено у виробництво на площі 21,8 га в фермерському господарстві «Володимир» Калуського району Івано-Франківської

області.

За матеріалами досліджень одержано 5 патентів на корисну модель.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням авторки, яка брала безпосередню участь в обґрунтуванні наукової проблеми, розробленні схеми польових дослідів, визначенні мети, завдань і підборі методик досліджень, аналізі та статистичній обробці отриманих експериментальних даних, формулюванні наукових висновків, а також у демонстрації та впровадженні результатів досліджень у виробництво. Зі спільних наукових праць у дисертаційній роботі автором використано результати власних досліджень та лабораторних аналізів.

**Апробація результатів досліджень.** Основні положення та результати дисертаційного дослідження апробовані на численних конференціях, міжнародного та національного рівня, зокрема результати VIII Міжнародної науково - практичної конференції «Сучасний рух науки» (3 – 4 жовтня 2019, Дніпро); Міжнародної науково – практичної інтернет – конференції, присвяченої Міжнародному Дню агрохіміка «Актуальні проблеми ґрунтознавства, землеробства та агрохімії» (9 – 13 червня 2017, Львів); III Всеукраїнської науково – практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Актуальні проблеми сучасної хімії» (24 травня 2019, Миколаїв,); XLVI Міжнародної науково – практичної конференції «Актуальні наукові дослідження в сучасному світі» (26 – 27 лютого 2019, Переяслав – Хмельницький,); VI Міжнародного конгресу «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (23 – 25 вересня 2020, Львів); The 11-th International scientific and practical conference «Actual trends of modern scientific research» (June 6 – 8 2021, Munich, Germany.); VI-й Міжнародний молодіжний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (9 – 10 лютого 2021, Львів.); The V-th International scientific and practical conference «Science, innovations and education: problems and prospects» (8 – 10 December 2021, Tokyo, Japan); Міжнародна науково – практична конф. «Агрохімічні ресурси та управління біопродуктивністю агроландшафтів» (23 – 25 листопада 2021, Київ); The XI-th International Scientific and Practical Conference. «Methodological and attitudinal principles of classical science» (13 – 14 March 2023, Stockholm, Sweden); The X-th International Scientific and Practical Conference «Innovative ways of learning development», (13 – 15 March 2023, Varna, Bulgaria); The XXII-th International Scientific and Practical Conference. International Trends in Science and Technology, (28 February, 2020, Warsaw, Poland); The V-th International scientific and practical conference «Science and education: problems, prospects and innovations» (4 – 6 February 2021, Kyoto, Japan); The V-th International scientific and practical conference «European scientific discussions» (1 – 3 February 2021, Rome, Italy); The III-th international scientific and practical conference, (7 – 9 February 2021, Buenos Aires, Argentina); International Conference on Research and Development in Science «Technology and management in the Current Era», (February 2021, India); The VII-th International Scientific and Practical Conference. «Science, trends and perspectives of development» (21 – 23 February 2022, Budapest, Hungary); The V-th International Scientific and Practical Conference. «Eurasian Scientific Discussions» (5 – 7 June 2022, Barcelona, Spain); The I-th International Scientific and Practical Conference «World science

priorities» (15 – 16. December 2022, Viena, Austria); The IX-th International Scientific and Practical Conference. «Promising ways of solving scientific problems» (26 – 28 December 2022, Belgium, Brussels); Матеріали III-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Current questions of modern science» (09 – 10 березня 2023, Івано-Франківськ); The XI-th International Scientific and Practical Conference «Methodological and attitudinal principles of classical science» (13 – 14 March 2023, Stockholm, Sweden); The X-th International Scientific and Practical Conference «Innovative ways of learning development» (13 – 15 March 2023, Varna, Bulgaria.); The VI-th International Scientific and Practical Conference «Scientific research in the modern world» (6 – 8 April 2023, Toronto, Canada.); The XVII-th International Scientific and Practical Conference «The research process in science and the implementation of results» (24 – 25 April 2023, Maribor, Slovenia).

**Публікації.** Основні результати і висновки дисертаційного дослідження опубліковано у 63 працях, у тому числі 17 – у закордонних виданнях, що входять до наукометричних баз даних Scopus і Web of Science, 7 – статей у фахових наукових виданнях України, 2 – у зарубіжних наукових збірниках, 5 – в інших виданнях наукового та науково-практичного характеру, 25 – у матеріалах і тезах наукових форумів, конференцій. За результатами досліджень отримано 5 патентів на корисну модель, 2 колективні монографії, видані за кордоном.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, 8 розділів, висновків, рекомендацій виробництву, списку використаної літератури та додатків. Основний матеріал дисертаційної роботи викладено на 379 сторінках комп'ютерного тексту. Дисертаційна робота містить містить 121 таблицю, 148 рисунків, 90 додатків.

Перелік використаних джерел наукової літератури складається з 407 назв, із яких 210 – латиницею.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

### **ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВНЕСЕННЯ ОСАДУ СТИЧНИХ ВОД ЯК ДОБРИВА ПІД ЕНЕРГЕТИЧНІ КУЛЬТУРИ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)**

У цьому розділі на основі доступних джерел наукової інформації здійснено критичний аналіз перспектив використання ОСВ як добрива, в тому числі й розглянуто ефективність його внесення під енергетичні культури, а також основні технологічні переваги та екологічні ризики застосування. Повторне використання ОСВ відповідає принципам циркуляційної економіки, а його внесення під енергетичні культури – підходам Зеленого курсу, зумовлюючи зростання частки відновлюваних джерел в енергетичному балансі, обмежуючи викиди парникових газів порівняно з використанням викопних видів палива (вугілля, нафти тощо), сприяючи секвеструванню CO<sub>2</sub> в агроєкосистемах. Водночас, ОСВ залежно від джерела його отримання і способів очищення, може містити різного роду забруднюючі сполуки, що може призвести до погіршення стану довкілля і негативно вплинути на здоров'я людини та стійкість екосистем.

Таким чином, використання ОСВ як добрива під енергетичні культури відзначається значним потенціалом застосування в агросфері, однак вимагає обачливого підходу, належного контролю та ґрунтовних досліджень стосовно його раціонального та екологічно безпечного застосування в агрофітоценозах.



## ПРОГРАМА, МЕТОДИКА ТА УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Польові дослідження виконані на колекційно-дослідному полі Івано-Франківського фахового коледжу Львівського національного університету природокористування (с. Чукалівка Івано-Франківської міської ради) та на території с. Ценжів Ямницької сільської об'єднаної територіальної громади Івано-Франківської області впродовж 2016 – 2022 років. У польових умовах вирощували такі енергетичні культури: верба енергетична (*Salix viminalis*), міскантус гігантський (*Miscanthus X giganteus*), сільфія пронизанолиста (*Silphium perfoliatum L.*), світчграс (*Panicum virgatum L.*), топінамбур (*Helianthus tuberosus*)).

Завданням досліджень було встановити еколого-агрохімічну ефективність застосування ОСВ та компостів на їх основі з органічними матеріалами (солома злакових культур, тирса хвойних порід дерев) як добрива під енергетичні культури на дерново-підзолистих ґрунтах Передкарпаття та впливу на екологічний стан ґрунтового покриву, особливості транслокації важких металів у системі «ґрунт – рослина», а також хімічний склад та продуктивність вирощуваних культур.

Дослідженням передбачено вивчення хімічного складу ОСВ м. Івано-Франківська із КП Івано-Франківська станція аерації ДК Екотехпром та компостів, виготовлених безросередньо на дослідній ділянці у такому складі: компост (ОСВ + тирса (3 : 1)) – компост 1; компост (ОСВ + солома (3:1)) – компост 2; компост (ОСВ + солома (3:1) + цементний пил 10% – компост 3. Компостні бурти формували завширшки 4 м і довжиною 5 – 6 м. На подушку зі соломи (тирси) товщиною 50 см почергово вкладали шарами ОСВ і солому (тирсу) завтовшки 30 – 40 см. Компост, який містив цементний пил – компост 3, готували аналогічно тільки кожен шар ОСВ посипали цементним пилом завтовшки 1,0 – 2,0 см. Зовнішню поверхню бурта вкривали шаром ґрунту близько 30 см. Загальна висота бурта у період дозрівання була 1,5 – 2,0 м. Дозрівали виготовлені компости протягом трьох місяців вегетаційного періоду. Вносили компости з одночасним переміщенням вмісту бурта вручну та відбором і формуванням середніх зразків для визначення основних агрохімічні показників методом конверта.

Польові дослідження з визначення еколого-агрохімічної оцінки застосування ОСВ під час повторного його внесення за вирощування верби енергетичної на дерново-підзолистих ґрунтах Івано-Франківської області, а саме на колекційно-дослідному полі Івано-Франківського фахового коледжу Львівського національного університету природокористування (с. Чукалівка Івано-Франківської міської ради) проводили за такою схемою: 1. Контроль – без добрив; 2. Мінеральні добрива –  $N_{100}P_{100}K_{100}$ ; 3. ОСВ – 40 т/га; 4. ОСВ – 60 т/га; 5. ОСВ – 80 т/га; 6. Компост (ОСВ + тирса (3:1)) – 60 т/га; 7. Компост (ОСВ + солома (3:1)) – 20 т/га; 8. Компост (ОСВ + солома (3:1)) – 40 т/га; 9. Компост (ОСВ + солома (3:1)) – 60 т/га; 10. Компост (ОСВ + солома (3:1) + цементний пил 10%) – 40 т/га. Схема садіння культури – 0,33 x 0,70 м. Ширина ділянки 4,0 м; довжина – 7 м; облікова площа – 28 м<sup>2</sup>. Повторність – триразова, розміщення ділянок – систематичне.

Польові досліді із міскантусом, сільфією пронизанолистою, світчграсом та топінамбуром проводили на дерново-підзолистих ґрунтах Передкарпаття на території с. Ценжів Ямницької сільської об'єднаної територіальної громади Івано-Франківської області. Схема садіння бульб топінамбура, ризом міскантуса – 0,50 x 0,70 м, висівання світчграсу і сільфії пронизанолистої – з шириною міжрядь 0,70 м.

Висаджування посадкового матеріалу проводили вручну, використовували добірні великі бульби топінамбура округлої форми зі загортанням їх у ґрунт на глибину 8 – 10 см. Висаджування ризом проводили вручну та загортанням їх у ґрунт на глибину 10 – 15 см. Висівання насіння світчґрасу і сільфії проводили вручну та загортали на глибину 5 – 8 см. Загальна площа кожної дослідної ділянки 63,0 м<sup>2</sup>, облікова площа – 35,0 м<sup>2</sup>, розміщення ділянок у триразовій повторності систематичне. Варіанти дослідів для всіх досліджуваних культур були однаковими: 1. Контроль – без добрив; 2. N<sub>60</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub>; 3. N<sub>90</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub>; 4. ОСВ – 20 т/га + N<sub>50</sub>P<sub>52</sub>K<sub>74</sub>; 5. ОСВ – 30 т/га + N<sub>30</sub>P<sub>33</sub>K<sub>66</sub>; 6. ОСВ – 40 т/га + N<sub>10</sub>P<sub>14</sub>K<sub>58</sub>; 7. Компост (ОСВ + солома (3:1)) – 20 т/га + N<sub>50</sub>P<sub>16</sub>K<sub>67</sub>; 8. Компост (ОСВ + солома (3:1)) – 30 т/га + N<sub>30</sub>K<sub>55</sub>.

У всіх варіантах, крім 1 і 2, сумарне внесення макроелементів живлення (НРК) корегували дозою мінеральних добрив з розрахунку N<sub>90</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub>.

Вивчення ефективності відновлення нафтозабруднених ґрунтів за внесення ОСВ проводили на дослідній ділянці в с. Битків Надвірнянського нафтогазоносного району Південно-Гвіздецького нафтового родовища Івано-Франківської області протягом 2018 – 2022 рр. Виробничу діяльність на території дослідної ділянки було зупинено 45 років тому (амбар 1) і 25 років тому (амбар 2). На забрудненій нафтопродуктами території закладали польові дослідні ділянки з шириною експериментальних ділянок – 5,0 м; довжиною – 7,0 м; висаджували та висівали на модельні дослідні ділянки площею 25,0 м<sup>2</sup> у трьох повтореннях розміщених рендомізовано. В якості контрольної ділянки (фонові області) обрано площу дослідного поля на відстані до 150 м від закладання дослідних варіантів (2 – 8)). Схема дослідів: 1. Контроль – фонові ділянки; 2. N<sub>60</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub>; 3. N<sub>90</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub>; 4. ОСВ – 20 т/га + N<sub>50</sub>P<sub>52</sub>K<sub>74</sub>; 5. ОСВ – 30 т/га + N<sub>30</sub>P<sub>33</sub>K<sub>66</sub>; 6. ОСВ – 40 т/га + N<sub>10</sub>P<sub>14</sub>K<sub>58</sub>; 7. Компост (ОСВ + солома (3 : 1)) – 20 т/га + N<sub>50</sub>P<sub>16</sub>K<sub>67</sub>; 8. Компост (ОСВ + солома (3 : 1)) – 30 т/га + N<sub>30</sub>K<sub>55</sub>.

Повторне внесення ОСВ під вербу енергетичну здійснювали рано навесні тільки в міжряддя під заробку мінікультиватором. Добрива під міскантус, сільфію, пронізанолисту, світчґрас, топінамбур вносили рано навесні під заробку дисковою бороною. Розрахунок доз добрив проводили за вмістом сухої органічної речовини добрив. Мінеральні добрива вносили у формі аміачної селітри, суперфосфату, калійної солі. В усіх варіантах з добривами, крім 2 і 3, вносили основне добриво (ОСВ, компост) з корегуючою дозою мінеральних добрив з розрахунку N<sub>90</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub>.

Лабораторні дослідження проводили в науково-дослідній лабораторії моніторингу вод та ґрунтів Дністровського басейнового управління водних ресурсів (Свідоцтво про атестацію за № LB 06/18 від 18.02.2018 р.), Лабораторії моніторингу вод Західного регіону Дністровського басейнового управління водних ресурсів (Свідоцтво про акредитацію за № 202265, чинне до 23 вересня 2026 року), а також в лабораторії гама-резонансної спектроскопії з аналізом електронів конверсії, гамма- та рентгенівського випромінювання ПНУ ім. В. Стефаніка.

Усі лабораторні дослідження здійснювали згідно стандартизованих методик: відбирання проб для хімічних аналізів проводили згідно ДСТУ 4287 пошарово до глибини 80 см; для фізико-хімічних аналізів – згідно ДСТУ ISO 11464; у зразках ґрунту з непорушеною будовою визначали щільність будови згідно ДСТУ ISO 11272; визначення вмісту гумусу в ґрунті – за методом Тюріна в модифікації М.М. Конової та Н.П. Бельчикової, спалювання за Б.А. Нікітіним (варіант ННЦ ІГА)

згідно з МВВ 31-497058-006-2002 (ДСТУ 7855:2015); лабільних форм – згідно з ДСТУ 4732; фракційно-груповий склад гумусу – за методом Пономарьової – Плотникової згідно з ДСТУ 7828:2015; рН – згідно ДСТУ ISO 10390; гідролітичну кислотність – згідно ДСТУ 7537:2014; вміст обмінних катіонів – за МВВ 31-497058-007; вміст загального азоту – згідно ДСТУ 4726, нітратного та амонійного азоту – згідно ДСТУ 4729; рухомих сполук фосфору і калію за методом Кірсанова згідно ДСТУ 4405; визначення мікроелементів і важких металів проводили за методиками згідно ДСТУ 4770.1 – ДСТУ 4770.9.

Визначення нітрифікаційної активності згідно ДСТУ 8578:2015; Визначення загальної біологічної активності газохроматичним методом згідно ДСТУ 8644:2016; Визначення чисельності мікроорганізмів у ґрунті методом посіву на тверде (агаризоване) живильне середовище ДСТУ 7847:2015; Визначення загальної біологічної активності згідно ДСТУ 8644:2016.

Аналіз рослин проводили за стандартними методиками: ДСТУ 4811:2007, ДСТУ ISO 712:2015. Важкі метали та мікроелементи у рослині визначали рентгенофлуоресцентним методом. Результати вимірювання представлені у порядку зростання атомної маси хімічних елементів згідно періодичної таблиці. Якщо хімічний елемент у списку результатів відсутній, тоді його доля у зразку занадто мала (приблизно менше 1/1000000 за масою). Для оцінки забруднення біомаси рослин за вмістом важких металів використовували загальноприйняті ГДК.

Для оцінки екологічного стану ґрунтового та фітоценотичного середовища здійснювали розрахунки показників згідно формул.

Коефіцієнт біологічного поглинання (К<sub>ba</sub>):

$$K_{ba} = \frac{Lx}{Nx}$$

Біогеохімічна активність (В<sub>ga</sub>):

$$V_{ga} = \sum K_{ba}$$

Коефіцієнт біологічного накопичення:

$$K_b = \frac{C_{plant}}{C_{soil}}$$

Коефіцієнт концентрації (К<sub>c</sub>):

$$K_c = \frac{C_{i\ soil}}{C_{soil}}$$

Коефіцієнт рухомості елемента (E<sub>mf</sub>):

$$E_{mf} = \frac{F_{ms}}{F_{qs}}$$

Коефіцієнт переходу важких металів (C<sub>thm</sub>) із коренів у надземну частину рослини за формулою:

$$C_{thm} = \frac{C_{aboveground\ part}}{C_{roots}}$$

Індекс внутрішньо-тканинного забруднення рослин (I<sub>i-tp</sub>) за формулою:

$$I_{(i-tp)} = \frac{L_{X_i}}{L_0}$$

Коефіцієнт транслокації корінь–стебло (K<sub>TF</sub>):

$$C_{FT} = \frac{C_{plant}}{C_{soil}}$$

Інтегральний показник забруднення ґрунтового покриву (IS) за формулою:

$$IS = n \sum_{i=3} \frac{c_i^1}{c_{fi}} + n \sum_{i=3} \frac{c_i^2}{c_{fi}}$$

Для оцінки рівня токсичності ґрунту у різних варіантах досліду пророщували насіння чутливих тест-об'єктів: редиски (*Raphanus sativus*), капусти білоголової (*Brassica oleracea var. capitata*), крес-салату (*Lepidium saivum L.*). У чашках Петрі на фільтрувальному папері розміщували 1 г подрібненого досліджуваного ґрунту та заливали 5 – 7 мл відстояної кип'яченої водопровідної води, викладали 25 насінин тест-культури. Чашки Петрі поміщали в термостат і пророщували насіння протягом десяти днів за  $t = +20^{\circ}\text{C}$ . Після цього рослини видаляли з ґрунту і проводили біометричні дослідження довжини коренів та проростків. Виходячи з кількості утвореної рослинної маси, фітотоксичний ефект (PhE) розраховували за формулою:

$$\text{PhE} = \frac{M_0 - M_x}{M_0} * 100$$

Аплікаційний метод застосовували для вивчення біологічної активності ґрунту. Вносили льняну тканину в ґрунт, розміром 30\*30 см, на глибині до 0 – 40 см і періодично (3 рази) у літній період визначали інтенсивність розкладу під впливом ґрунтової мікрофлори та мікрофауни. Це дозволило оцінити інтенсивність розкладу та зробили висновки про рівень біологічної активності ґрунту.

У наших дослідженнях ефективність вирощування верби енергетичної, міскантуса, сільфії пронизанолістої, світчграсу, топінамбура визначали як відношення валової енергії, акумульованої врожаєм, до енергетичних витрат на виробництво біомаси з одиниці площі:

$$K_{ee} = \frac{E_6}{E_3}$$

Величина валової енергії:  $BE_y = V \cdot K_c \cdot q_{np}$ .

Сукупність енергетичних затрат:  $\sum Q_{np} = Q_{пт} + Q_{п} + Q_{ee} + Q_{те} + Q_{вер}$

Опрацювання результатів експериментальних досліджень проводили з використанням методів математичної статистики за допомогою програми STATISTICA 6.0, MathCAD та EXEL. Первинні аналітичні матеріали включали аналіз за рівняннями лінійної регресії.

## ОЦІНКА ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ОСВІДЧЕНИХ ВОД КОМУНАЛЬНОГО ГОСПОДАРСТВА

Порівняльний аналіз хімічного складу ОСВ та інших органічних сировинних ресурсів як органічних добрив, відібраних на різних тваринницьких комплексах Івано-Франківської, показав, що досліджувані зразки ОСВ відзначалися підвищеним умістом вологи – на рівні 67%, що переважало аналогічні показники у курячому посліді і торфі, вищими показниками вологості 7,1 і 86% відзначалися тільки гній ВРХ і гній свиней, отриманий за промислового утримання на щілинній підлозі. Це зумовило зниження умісту органічної речовини і відповідно азоту в ОСВ на 0,84% на суху речовину порівняно зі стандартними значеннями (1,5%). Зольність ОСВ також була суттєво нижчою від нормативних показників на рівні 25%. Проте

показники вмісту фосфору (2,5% на суху речовину) у 3,6 раза переважали нормативні значення і були найвищі, порівняно з іншими досліджуваними зразками, а вміст калію становив 2,2% на абсолютно суху речовину і був дещо нижчим від показників гною ВРХ. Показник рН становив 8,1, що свідчить про певні меліоративні властивості ОСВ і можливість його використання на певних типах ґрунтів з кислою реакцією ґрунтового середовища. Санітарно-епідеміологічний склад ОСВ був у межах норми.

ОСВ містить не тільки органічну речовину, цінні поживні елементи для рослин – макро- і мікроелементи, але й шкідливі сполуки, насамперед важкі метали. Крім загального вмісту важких металів ОСВ визначали їхню біодоступність та порівнювали з рівнями ГДК. Особливої уваги заслуговують сполуки кадмію, оскільки цей елемент належить до першого класу екологічної небезпеки. Як показали дослідження вміст кадмію в ОСВ становив 2,7 і 0,8 мг/кг відповідно у міцнозв'язаній і рухомій формах, міді – 26,0 і 14,9 мг/кг, цинку – 14,7 і 7,2 мг/кг, нікелю – 44,2 і 4,61 мг/кг (рис. 1).

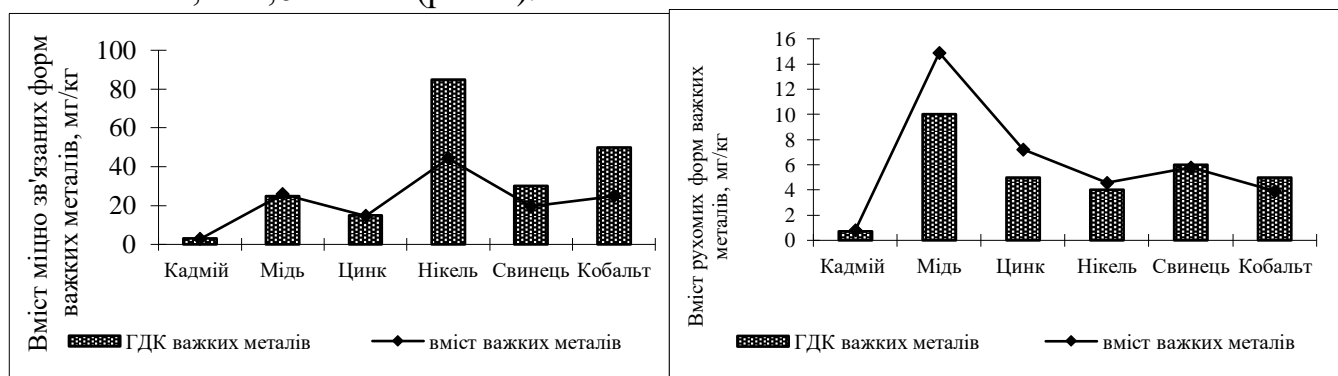


Рис. 1. Вміст міцно зв'язаних та рухомих форм важких металів в ОСВ

Рухомі сполуки кадмію і нікелю незначно перевищують ГДК важких металів у ОСВ, а міді і цинку – дещо більше. Разом і з показниками хімічного складу це актуалізує виготовлення компостів для покращання хімічного складу удобрювального матеріалу.

У виготовлених компостах вміст органічної речовини коливався в межах 75 – 78%, показник кислотності рН становив 7,1 – 7,5, азоту лужногідролізованих сполук становив 708,6 мг/кг у компості 1 та зменшувався у компостах 2 – 3 відповідно до 223,2; 637,3 мг/кг. Меншою мірою коливався вміст фосфору рухомих сполук (від 392,2 до 432,5 мг/кг) і калію обмінних форм (від 199,1 до 401,7 мг/кг). Завдяки компостуванню ОСВ з вміст поллютантів значно зменшувався; компости на основі ОСВ та соломи характеризувалися кращими агрохімічними властивостями як добрива. Запропоновані способи екологічно безпечного застосування ОСВ під енергетичні культури у вигляді компостів з іншими органічними матеріалами отримали охоронні документи на право інтелектуальної власності.

## ВПЛИВ ЗАСТОСУВАННЯ ОСАДУ СТИЧНИХ ВОД НА АГРОЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН ДЕРНОВО-ПІДЗОЛИСТОГО ҐРУНТУ

Внесення ОСВ безпосередньо впливає на фізико-хімічні властивості ґрунту, доступність поживних речовин рослинам, характер та інтенсивність їх поглинання. А саме, під впливом внесення ОСВ та компостів на його основі знижувався не тільки

показник гідролітичної кислотності з 3,27 до 2,80 ммоль/100 г ґрунту під усіма вирощуваними культурами, але й зростав уміст обмінних катіонів  $\text{Ca}^{2+}$  і  $\text{Mg}^{2+}$  у ґрунтовому вбирному комплексі та залежав від кількості внесеного ОСВ (рис. 2).

Застосування сумісно ОСВ та мінеральних добрив забезпечувало зниження вмісту обмінного водню в орному і підорному шарі, сприяло підвищенню вмісту катіонів кальцію та магнію та зростанню співвідношення між кальцієм та магнієм.

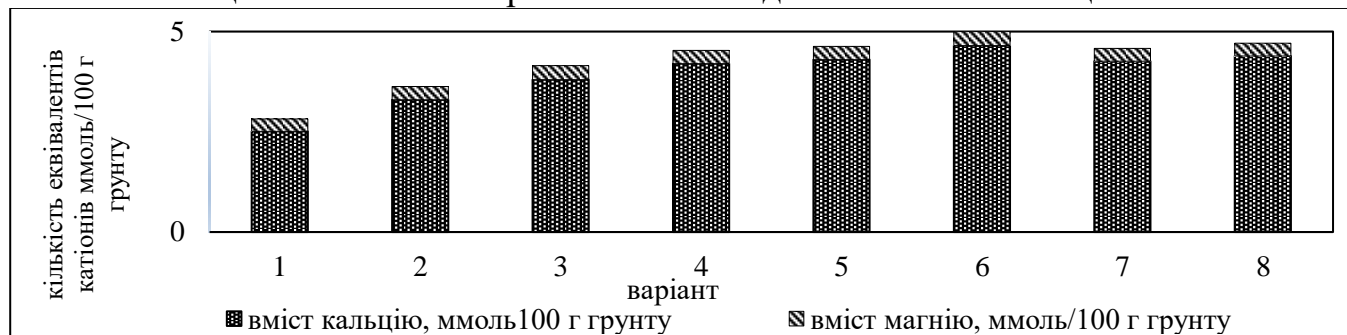


Рис. 2. Динаміка вмісту кальцію та магнію під впливом внесення ОСВ, за вирощування топінамбура

Заходи щодо підвищення родючості ґрунтів та продуктивності агроценозів тісно пов'язані зі створенням стабільного бездефіцитного балансу гумусу в ґрунті. Порівнюючи варіанти, де вносили компост на основі ОСВ та соломи (3 : 1) у дозі 40 т/га і такої ж кількості компосту тільки з додаванням 10% цементного пилу під вербу енергетичну вміст активного гумусу залишився на рівні 0,65%, проте додавання цементного пилу сприяло незначному (0,66%) збільшенню активного гумусу, однак уміст загального гумусу зменшувався на 0,02% порівняно з внесенням ОСВ + солома – 40 т/га та відповідною кількістю мінеральних добрив. Із підвищенням дози ОСВ зростав стабільного гумусу до 1,74%, а в контрольному варіанті його частка знижувалася до 1%. За внесення ОСВ його вміст зростав, проте несуттєво і у всіх варіантах коливався в межах 0,60 – 0,66%. На відміну від показників лабільного гумусу показники стабільного (пасивного) гумусу зростали за внесення ОСВ достовірно. За повторного внесення ОСВ у дозі 40 т/га вміст пасивного гумусу становив 1,04%. Із підвищенням дози ОСВ зростав вміст пасивного гумусу до 1,12%. Зокрема у верхньому (0 – 20 см) і нижньому (20 – 40 см) шарах ґрунту частка стабільного гумусу на контролі без добрив становила 1,02 – 0,98% (рис. 3).

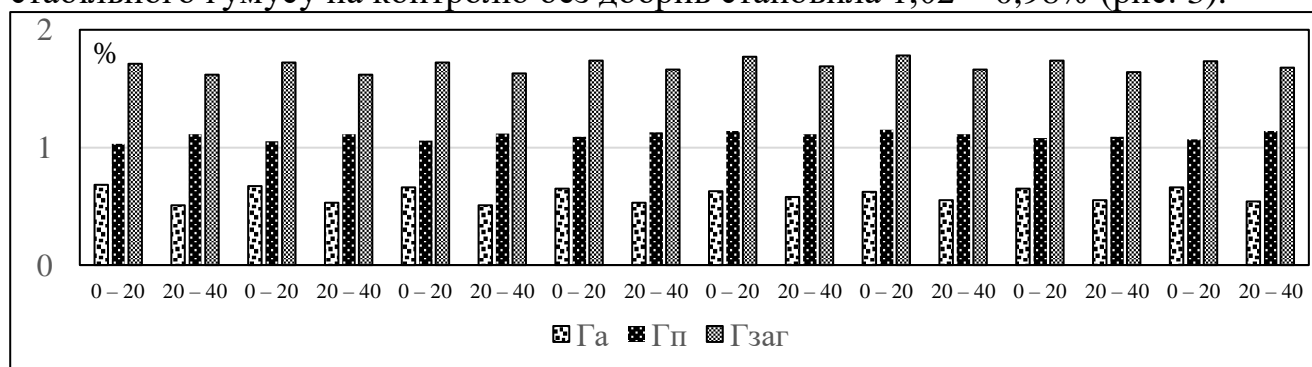
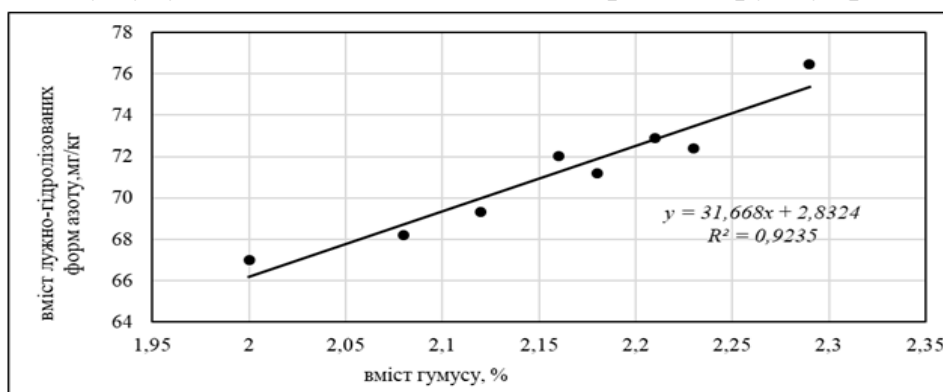


Рис. 3. Груповий склад гумусу ґрунту за внесення ОСВ та компостів на їх основі під трав'янисті культури, середнє за 2016 – 2022 рр.

Дослідженнями встановлено суттєві зміни фракційно-групового складу гумусу

за внесення ОСВ, що сприяло підвищенню абсолютного показника вмісту гумінових кислот в гумусі з 0,29% на контролі до 0,32 – 0,35% у варіантах з найвищими дозами внесення ОСВ та його компостів.

Із умістом гумусу тісно пов'язаний азотний режим ґрунту (рис. 4).



**Рис. 4. Залежність показників лужногідролізованих форм азоту від вмісту гумусу в дерново-підзолистому ґрунті за вирощування топінамбура, середнє 2017 – 2022 рр.**

Множинний коефіцієнт детермінації  $R^2$  становив 0,92, що вказує на високу тісноту зв'язку між цими показниками. Найвищі показники вмісту амонійного азоту зафіксовані у варіантах, де вносили найбільшу дозу ОСВ (40 т/га і  $N_{10}P_{14}K_{58}$ ) і рівна 1,20 мг/кг, що вказує на його позитивний вплив щодо перебігу процесів амоніфікації та нітрифікації.

У варіантах з найбільшою дозою ОСВ вміст нітратного азоту становив 2,3 – 2,5 мг/кг ґрунту, що свідчить про кращу забезпеченість азотом у верхньому шарі (0 – 20 см) дерново-підзолистого ґрунту. За умови повторного внесення ОСВ під вербу енергетичну у нормі 80 т/га у ґрунті на глибині 0 – 20 см відзначали найвищий уміст амонійного, мінерального та лужногідролізованого азоту, а на глибині 20 – 40 см – найвищий вміст нітратного азоту. Найвищі коефіцієнти концентрацій амонійного та загального азоту відзначено на глибині ґрунту 0 – 20 см за внесення ОСВ у нормі 40 т/га і добрива  $N_{10}P_{14}K_{58}$ , мінерального і лужногідролізованого азоту – на глибині 20 – 40 см у варіанті за внесення ОСВ у нормі 40 т/га і добрива  $N_{10}P_{14}K_{58}$ , нітратного – на глибині 0 – 20 см у варіанті де вносили компости (ОСВ + солома (3:1)) у нормі 30 т/га і  $N_{30}K_{55}$ .

За вирощування усіх енергетичних культур у ґрунтах відзначали підвищення концентрації фракцій азоту у такому порядку: загальний азот → нітратний азот → амонійний азот → мінеральний азот → лужногідролізований азот.

Сумарний вміст усіх фракцій азоту у ґрунті під вирощуваними культурами зростає у такому порядку: світчграс → міскантус → сільфія → топінамбур → верба енергетична.

Застосування ОСВ та компостів на його основі сприяло значному підвищенню вмісту рухомих сполук фосфору та обмінних сполук калію в дерново-підзолистому ґрунті. Це збільшення спостерігали в усіх варіантах дослідів у ґрунтовому профілі до глибини 60 см. Глибше 60 см різниця у варіантах дослідів була менш вираженою, а для фосфору – майже непомітною (в межах похибки).

Найвищі показники вмісту фосфору та калію зафіксовано у варіантах із

внесенням свіжого ОСВ, які становили відповідно 90,1 і 96,8 мг/кг ґрунту, рухомих сполук фосфору та обмінного калію у верхньому (0 – 20 см) шарі ґрунту. (варіант з найбільшою нормою внесення ОСВ – варіант 6). У підґрунтовому шарі (20 – 40 см) для дослідних варіантів відмінність також була достовірною порівняно з контролем, але вміст рухомих сполук фосфору змінювався менше, ніж показники калію У дозі  $N_{60} - P_{60} - K_{60} - 90$  коефіцієнт концентрації сполук фосфору становив 1,01 – 1,17 в орному шарі ґрунту (0 – 20 см), а по профілю ґрунту до глибини 60 см збільшувався і змінювався в діапазоні 1,02 – 1,15 (20 – 40 см) (рис. 5 і 6).

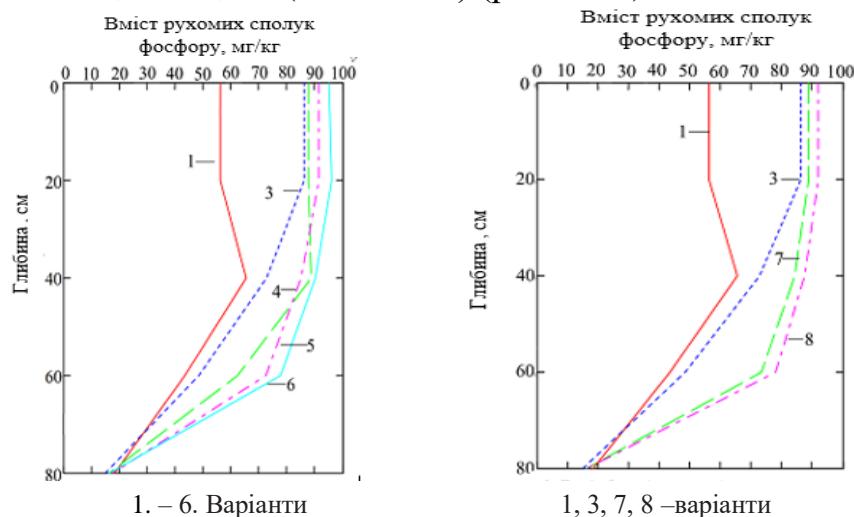


Рис. 5. Вплив унесення ОСВ та компостів на вміст рухомих сполук фосфору в дерново-підзолистому ґрунті, середнє за 2016 – 2022 рр.

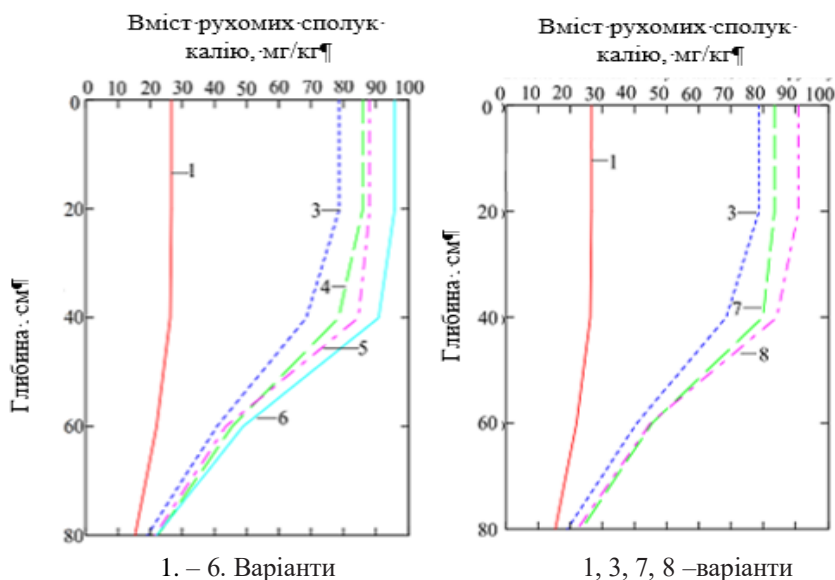


Рис. 6. Вплив ОСВ та компостів на вміст сполук калію в дерново-підзолистому ґрунті, середнє за 2016 – 2022 рр.

Кореляційно-регресійний аналіз показав, що коефіцієнт концентрації фосфору найбільше залежить від вмісту рухомих його сполук у ґрунті з коефіцієнтами детермінації  $R^2 = 0,69$  та кореляції  $r = 0,72$ . Рівняння множинної регресії може виглядати так:  $y = 62,7482 + 20,2833 * x$ , де  $x$  – вміст рухомих сполук фосфору в ґрунті, мг/кг ґрунту;  $y$  – коефіцієнт концентрації фосфору (рис. 7).

За результатами кореляційно-регресійного аналізу встановлено, що



коефіцієнт концентрації калію найбільше залежить від вмісту його обмінних сполук у ґрунті з коефіцієнтами детермінації та кореляції  $R^2 = 0,90$ ,  $r = 0,93$ . Рівняння множинної регресії може виглядати так:  $y = 39,7151 + 23,4049 * x$ ; де  $x$  – вміст метаболітів калію в ґрунті, мг/кг ґрунту;  $y$  – коефіцієнт концентрації калію.

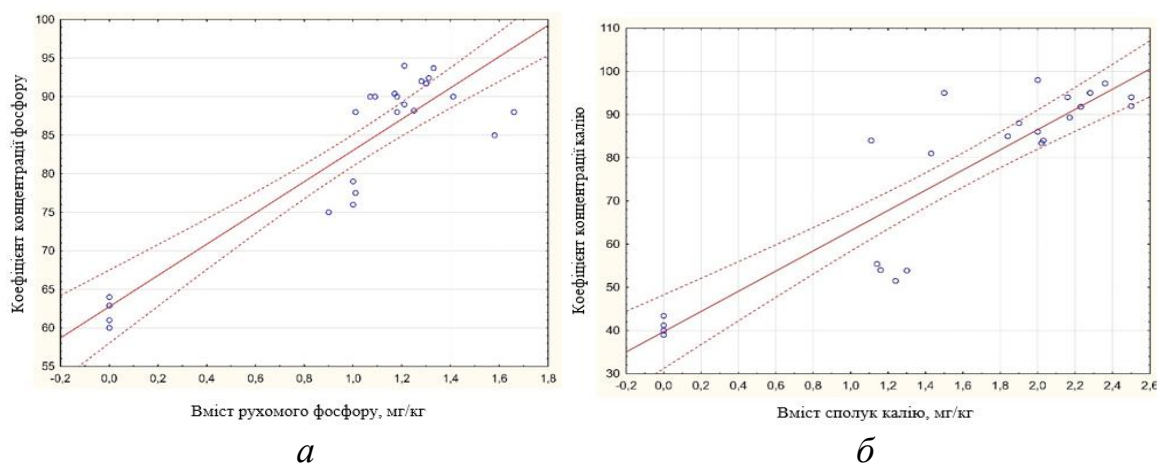


Рис. 7. Кореляційна залежність коефіцієнта концентрації фосфору (а) і калію (б) від вмісту їх сполук у дерново-підзолистому ґрунті.

Вивчення динаміки біологічної активності ґрунту на колекційно-дослідному полі під час вирощування верби енергетичної у середньому за 4 роки досліджень в усіх варіантах дослідження без винятку показало, що найвищі її показники спостерігали в шарі ґрунту 0 – 20 см. За внесення ОСВ у дозі 40 – 80 т/га в перший місяць у орному шарі ґрунту розклалося від 33,5 до 40,5% льняного полотна, а за два місяці – більше від 39,3 до 49,1%. За внесення компостів на основі ОСВ та соломи (3 : 1) у дозі 20 – 60 т/га в перший місяць у орному шарі ґрунту розклалося від 35,1 до 37,9 % льняного полотна, а за два місяці – більше від 46,3 до 56,9 %. За три місяці розклад тканини найінтенсивніший відбувався за повторного внесення ОСВ у дозі 80 т/га і в шарі ґрунту 0 – 20 см сягав 76,2%. Внесення компостів ОСВ + солома у дозі 60 т/га забезпечувало ступінь розкладання льняної тканини на рівні 75,5% у верхньому шарі, що на 17,6 % більше порівняно з контролем без добрив.

Чисельність різних фізіологічних груп мікроорганізмів, які беруть участь у трансформації азоту та вуглею, суттєво змінюється під впливом внесення мінеральних добрив, ОСВ та компосту на їх основі. Зокрема за повторного внесення мінеральних добрив у нормі  $N_{100}P_{100}K_{100}$  (варіант 2) загальна чисельність мікроорганізмів зростала на 291 тис. КУО/г в першій половині вегетації та на 213 тис. КУО/г ґрунту в другій половині вегетації. Повторне застосування ОСВ у нормі 40 – 80 т/га сприяло підвищенню цього показника на 496 – 1100 тис. КУО/г в першій половині вегетації та на 337 – 620 тис. КУО/г ґрунту в другій половині вегетації. Найвищими показниками загальної чисельності мікроорганізмів відзначалися ділянки, де повторно вносили ОСВ у нормі 80 т/га (варіант 5) та компост на основі ОСВ, соломи (3:1) та цементного пилу 10 % у нормі 40 т/га (варіант 10).

У цих варіантах загальна чисельність мікроорганізмів досягала 2,9 – 2,7 млн. КУО/г ґрунту відповідно, в першій половині вегетації. У другій половині вегетації загальна чисельність мікроорганізмів перебувала на рівні 2,1-1,9 млн КУО/г ґрунту відповідно. Слід зазначити, що застосування ОСВ забезпечувало значне підвищення

загальної чисельності мікроорганізмів у дерново-підзолистому ґрунті за вирощування верби енергетичної. У структурі фізіологічних груп мікроорганізмів переважають амілолітичні бактерії. Другою за чисельністю була група протеолітичних бактерій. Їхня чисельність змінювалась у діапазоні 574 – 1039 тис. КУО/г в першій половині вегетації. У другій половині вегетації відбувалось загальне зниження чисельності цієї групи мікроорганізмів у всіх варіантах дослідження, завдяки сповільненню мінералізації органічних сполук у ґрунті. Зміни чисельності протеолітичних мікроорганізмів у варіантах де застосовували компости на основі ОСВ та соломи (3 : 1) у нормі 20 – 60 т/га (варіанти 7 – 9) змінювалась у діапазоні 9,0 – 1,0 млн. КУО.

Взаємний зв'язок між загальною чисельністю мікроорганізмів, співвідношенням Амілолітичні : Протеолітичні мікроорганізми та біологічною активністю в ґрунті можна відобразити рівнянням:

$$z = 385,9326 - 0,2131 * x - 137,848 * y + 3,1053E-5 * x^2 + 0,05 * x * y + 3,9971 * y^2$$

$z$  – біологічна активність, %;  $x$  – співвідношення Амілолітичні : Протеолітичні мікроорганізми;  $y$  – загальна чисельність мікроорганізмів, тис. КУО/г ґрунту.

Згідно значення множинного коефіцієнта кореляції ( $R^2 = 0,65$ ), кореляційний зв'язок можна вважати істотним. Подібні кореляційні зв'язки встановлено також і за вирощування інших енергетичних культур (рис. 8).

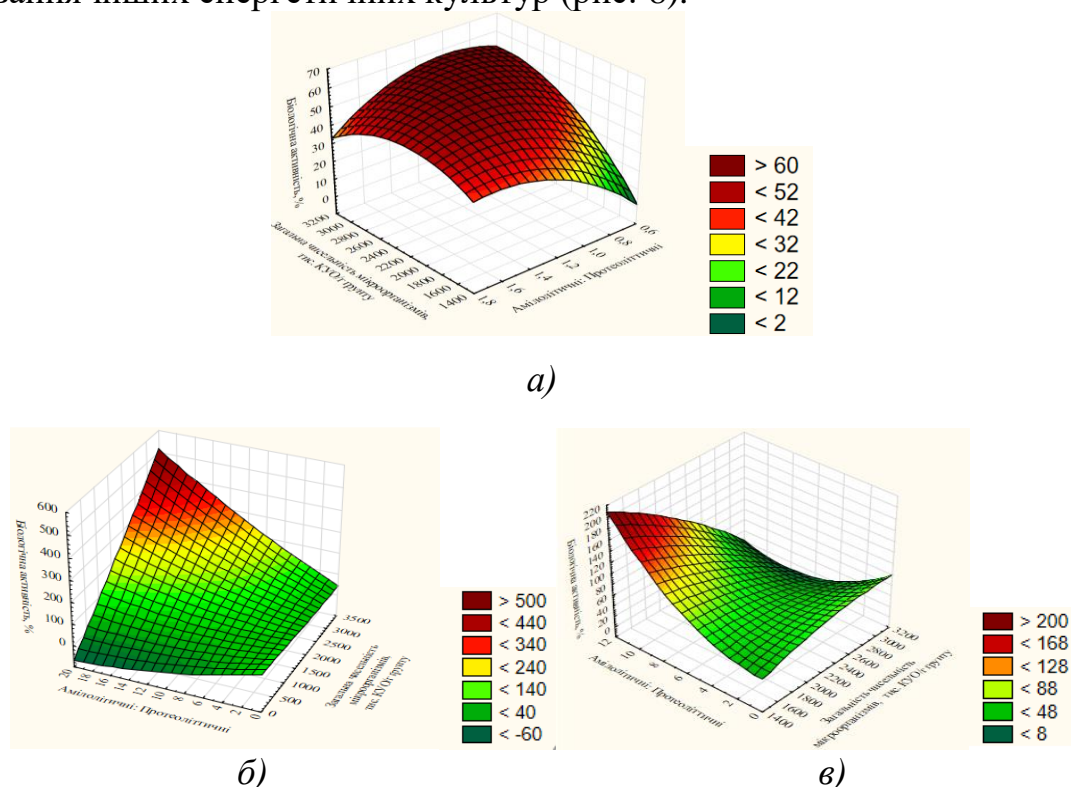


Рис. 8. Залежність між загальною чисельністю мікроорганізмів, співвідношенням Амілолітичні : Протеолітичні мікроорганізми та біологічною активністю в ґрунті, тис. КУО/г ґрунту

$a$  – Сильфія пронизанолиста (*Silphium perfoliatum* L);  $б$  – Міскантус гігантський (*Miscanthus giganteus*),  $в$  - Світчграс (*Panicum Virgatum* L).

Рівняння множинної регресії для цих показників можуть мати такий вигляд:

$$z = -193,0804 + 0,1207 * x + 155,6046 * y - 1,668 * x^2 - 0,0266 * x * y - 35,9082 * y^2 \quad (a)$$

$$z = 72,3259 - 0,0106 * x - 12,4074 * y + 8,625E-7 * x^2 + 0,0087 * x * y + 0,2657 * y^2 \quad (б)$$

$$z = -60,0565 + 0,0949 * x + 15,2231 * y - 1,604E-5 * x^2 - 0,0105 * x * y + 1,1191 * y^2 \quad (e)$$

$z$  – біологічна активність, %;  $x$  – співвідношення Амілолітичні : Протеолітичні мікроорганізми;  $y$  – загальна чисельність мікроорганізмів, тис. КУО/г ґрунту.

Множинні коефіцієнти детермінації ( $R^2 = 0,76 - a$ ;  $R^2 = 0,75 - б$ ;  $R^2 = 0,82 - в$ ) вказують на те, що кореляційні зв'язки можна вважати тісними для всіх вирощуваних культур.

Уточнюючий (контрольний) критерій Колмогорова – Смирнова підтверджує припущення про нормальність розподілу:  $p$ -рівень цього критерію більший за 0,2 (рис.9).

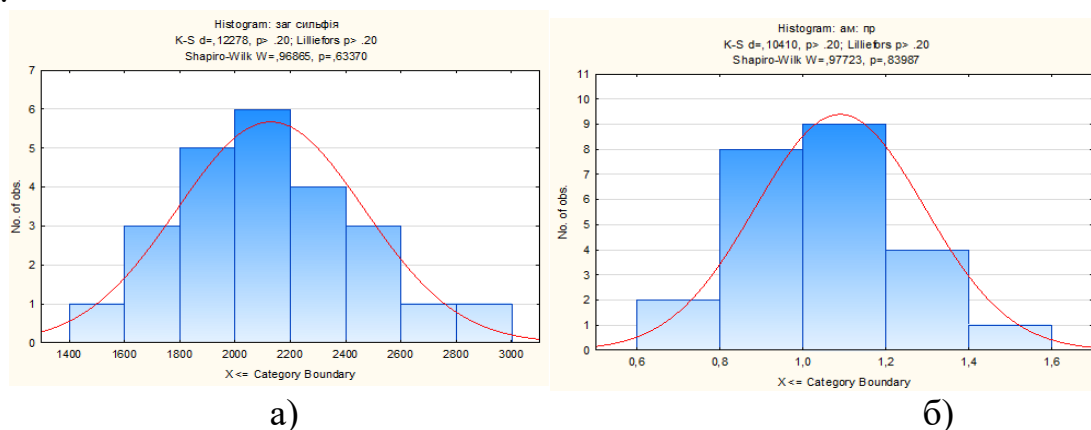


Рис. 9. Нормальний розподіл даних а) співвідношення мікроорганізмів: амілолітичні : протеолітичні; б) загальної чисельності мікроорганізмів за вирощування сільфії пронизанолістої, КУО/г

Для визначення рівня фітотоксичності ґрунту за внесення ОСВ якості тестових культур використали редиску (*Raphanus sativus*.), капусту білоголову (*Brassica oleracea var. capitata*) і крес-салат (*Lepidium sativum* L.). На основі проведених досліджень виявлено неоднозначність різних видів рослин на тест – реакції. Аналіз ростових процесів фіто-індикаторів у тест-варіантах за внесення ОСІ і компостів (варіанти 6 – 10) коливаються в межах 38 – 39% для редиски, капусти білоголової та крес-салату і визначають токсичність ґрунту на рівні „середній”. У зразках ґрунту, за внесення ОСВ у дозі 40 – 80 т/га токсичність ґрунту відзначалася в межах від 40 до 46%, а токсичність ґрунту на рівні „вище середнього”.

Таким чином, внесення ОСВ та компостів на його основі істотно впливало на агроекологічний стан дерново-підзолистого ґрунту, а саме сприяло зниженню гідролітичної кислотності ґрунту на 0,4 – 0,6%, сприяло підвищенню вмісту гумусових сполук на 0,1 – 0,12% з одночасним покращанням якісного складу гумусу, тобто підвищеннями частки гумінових кислот до 0,28 – 0,36%. зумовлювало покращання поживного режиму ґрунту та активізацію мікробіологічної активності на 47 – 61%. Однак найвищі дози ОСВ зумовлювали зростання фітотоксичності ґрунту зі «середнього» рівня до «вище середнього», що підтверджує необхідність постійного екологічного моніторингу за станом ґрунтових систем і довілля за внесення ОСВ під енергетичні культури.

## МІГРАЦІЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У ҐРУНТІ

Внесення ОСВ по різному впливає на динаміку нагромадження міцнозв'язаних і рухомих форм важких металів у дерново-підзолистому ґрунті. Застосування ОСВ у

помірних нормах 20 – 40 т/га та компостів 20 – 30 т/га зумовлювало значне підвищення вмісту у ґрунті усіх досліджуваних важких металів. Однак, їх уміст був у межах гранично допустимих концентрацій. Найвища норма внесення (варіант 6) зумовлювала найвищі в умовах дослідження показники умісту міцнозв'язаних і рухомих форм Pb, Ni, Co, тільки міцнозв'язаних форм – Cd, рухомих форм – Zn. У всіх випадках найвищі показники достовірно переважали показники інших варіантів.

Частка рухомих форм від міцнозв'язаних вмісту окремих важких металів коливалася в порівняно широкому діапазоні значень – Pb, Cd, Zn. Натомість Ni у варіантах з внесенням ОСВ частка рухомих форм коливалася в межах 5,4 – 5,8%, крім контрольного варіанта – 4,8%. Нами також відзначено певне зниження частки рухомих форм Cd з 59% у варіанті, де вносили тільки мінеральні добрива (варіант 3) до 42 – 46% у варіантах з внесенням ОСВ (варіанти 4, 5, 6). Причому збільшення норми внесення ОСВ зумовлювало зниження частки рухомих форм Cd у міцнозв'язаному їх умісті. Частка рухомих форм Co у ґрунті коливалася в межах 11,8 – 12,2% і практично не залежала від норми ОСВ і форми, у якій його вносили. Суттєве зниження частки рухомих форм Cu порівняно з контролем зафіксовано у варіантах з внесенням усіх видів добрив. Особливо зниження частки рухомих форм визначено у варіантах 7 і 8, де вносили компости на основі ОСВ і соломи зернових культур.

Таким чином, застосування ОСВ неоднозначно впливає на нагромадження міцнозв'язаних і рухомих форм важких металів у ґрунті та їх доступність рослинам. Підвищення дози ОСВ до норми 40 т/га зумовлює найвищі показники в ґрунті міцнозв'язаних форм Pb, Cd, Ni, Co, однак це зростання у 2,2 – 3,1 раза нижче ГДК.

Для оцінки можливостей трансформації важких металів із міцнозв'язаних форм у доступні для засвоєння рослинами рухомі форми визначали коефіцієнти рухомості під усіма культурами, для яких відзначено подібні закономірності з невеликими відхиленнями абсолютних значень (рис. 10).

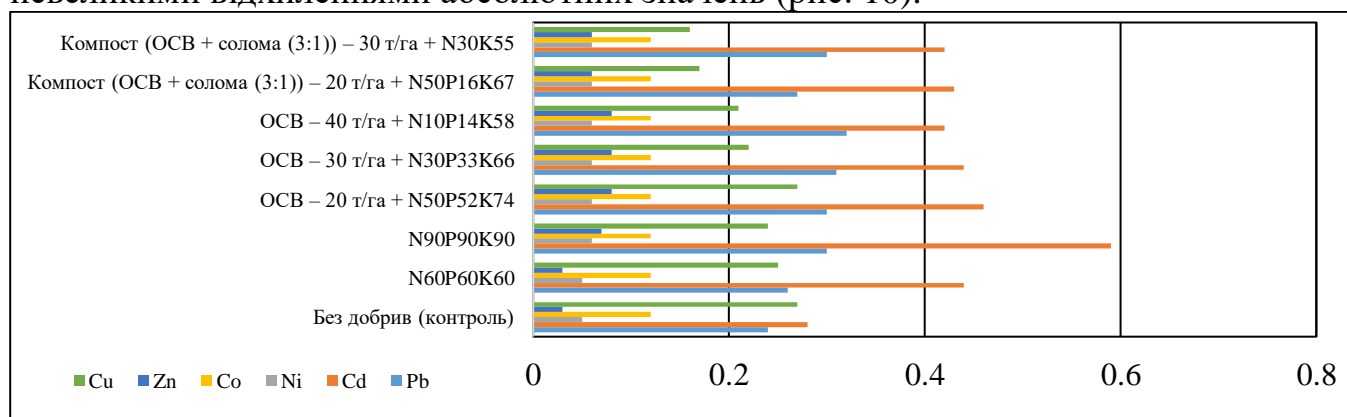


Рис. 10. Коефіцієнти рухомості важких металів в дерново-підзолистому ґрунті за внесення ОСВ і компостів під міскантус, середнє за 2018 – 2022 рр.

Величина коефіцієнта концентрації свідчить про активність процесів накопичення важких металів у ґрунті. Коефіцієнти концентрації міцнозв'язаних форм важких металів у підзолистому ґрунті за внесення найвищої норми ОСВ під *Miscanthus giganteus* зростають у ряді: Co→Pb→Ni→Zn→Cu→Cd. Коефіцієнти концентрації рухомих форм важких металів зростають у ряді: Cu→Co→Ni→Pb→Cd→Zn. У різних варіантах дослідження порядок зростання



показників коефіцієнтів концентрації змінювався значною мірою.

Найвищий вміст рухомих форм цинку, феруму і купруму відзначено у ґрунті після внесення компосту у нормі 30 т/га та добрива  $N_{30}P_{33}K_{66}$ , а вміст міцнозв'язаних форм плюмбуму і кобальту – після внесення компосту у нормі 30 т/га та добрива  $N_{30}K_{55}$ .

Відсутнє перевищення ГДК у ґрунтах у всіх варіантах дослідження за винятком рухомої форми купруму. Вміст рухомих форм важких металів у ґрунтах за вирощування топінамбура зростає у ряді: кадмій → нікель → кобальт → цинк → плюмбум → купрум → ферум. Вміст міцнозв'язаних форм важких металів у ґрунтах під плантацією топінамбура зростає у ряді: кадмій → плюмбум → кобальт → нікель → купрум → цинк → ферум.

### ВПЛИВ ЗАСТОСУВАННЯ ОСАДУ СТИЧНИХ ВОД НА ФОРМУВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР

Показники продуктивності вегетативної маси вказують, що за другого циклу використання агрофітоценозів збільшення біомаси енергетичної верби перевищує показники біомаси, отримані під час першого циклу використання.

Найпродуктивнішими за виходом сухої біомаси верби енергетичної є варіанти з повторним внесенням ОСВ у дозі 80 т/га та компосту на основі ОСВ + тирса (3 : 1) – 60 т/га відповідно. За внесення ОСВ в дозі 80 т/га вміст сухої біомаси становив 39,4 т/га, за повторного внесення 52,6 т/га. Підвищення продуктивності біомаси енергетичних культур суттєво залежало від агроєкологічного стану ґрунту, зокрема вмісту і складу гумусу (рис. 11).

Вміст гумусу є фактором, що впливає на енергетичну продуктивність верби. Це взаємозв'язок можна висловити за допомогою рівняння лінійної регресії.  $y = -4,934 + 43,7677x$ ; коли,  $y$  – вміст сухої маси, т/га;  $x$  – вміст загального гумусу в дерново-підзолистому ґрунті, %; Маючи на увазі значення коефіцієнта детермінації ( $R^2 = 0,59$ ), можна вважати, що існує значущий кореляційний зв'язок.

Співвідношення між вмістом гумусу та  $S_{гк} : S_{фк}$  можна висловити у вигляді лінійної регресійної моделі таким чином:  $y = 38,6597 + 9,1906x$ ; коли  $y$  – вміст сухої маси, т/га;  $x$  –  $S_{гк} : S_{фк}$  в дерново-підзолистому ґрунті, %; Враховуючи значення множинного коефіцієнта кореляції ( $R^2 = 0,51$ ), можна стверджувати про значущий характер кореляційного зв'язку.

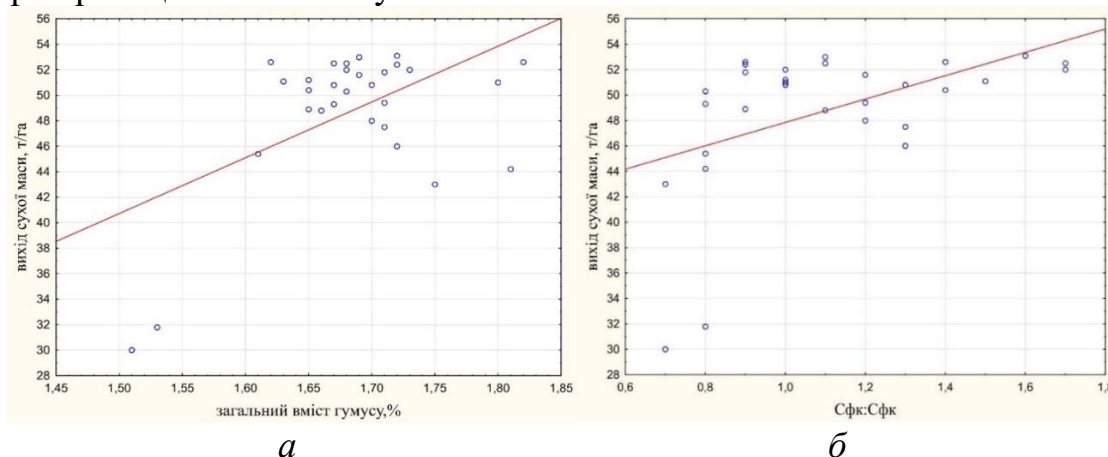


Рис. 11. Залежність продуктивності сухої маси верби енергетичної від

### умісту загального гумусу (а) та співвідношенням Сгк : Сфк (б) дерново-підзолистого ґрунту

Залежність висоти рослин від змісту загального гумусу в ґрунті можна відобразити у вигляді лінійної регресії за допомогою такого рівняння:  $y = 27,34 + 8,345x$ ; де  $y$  – площа листової поверхні,  $m^2/cm$ ;  $x$  – висота рослин, м. За значенням коефіцієнта детермінації ( $R^2 = 0,75$ ), можна стверджувати про значущий ступінь кореляційного зв'язку (рис. 12).

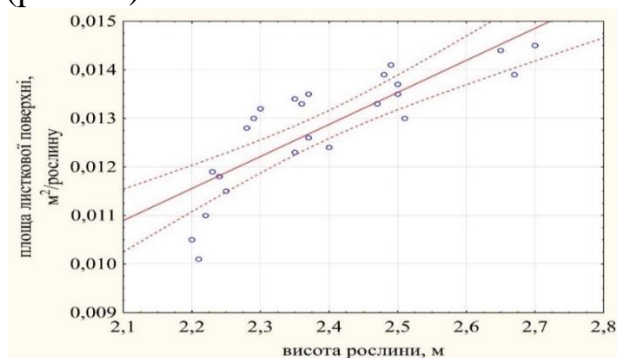


Рис. 12. Зв'язок між висотою рослини сільфії пронизанолистої (*Silphium perfoliatum* L) та площею її листової поверхні.

Залежність виходу сухої маси рослин сільфії пронизанолистої від висоти рослини  $y = 45,34 + 15,89x$ ; де  $y$  – вихід сухої маси рослин сільфії пронизанолистої, т/га;  $x$  – висота рослин, м. (рис.13).

На рис. 13 показана діаграма типу «ящик з вусами» для цього розподілу. Згідно проведених досліджень для сільфії пронизанолистої оптимальним є застосування добрив на основі ОСВ – 40 т/га та  $N_{10}P_{14}K_{58}$  (варіант 6). Проте, доцільно вносити і компости на основі ОСВ та соломи у співвідношенні 3:1 у нормі 30 т/га та  $N_{30}K_{55}$  (варіанти 7 та 8). Таке поєднання добрив не тільки забезпечує максимальний рівень продуктивності сільфії пронизанолистої, але, зважаючи на його невисоку вартість (в основному, це вартість перевезення та складування і внесення) та простоту у застосуванні це добриво може бути широко застосоване під час вирощування усіх енергетичних культур.

Експериментальний розподіл густини імовірностей продуктивності сільфії пронизанолистої залежно від внесених добрив

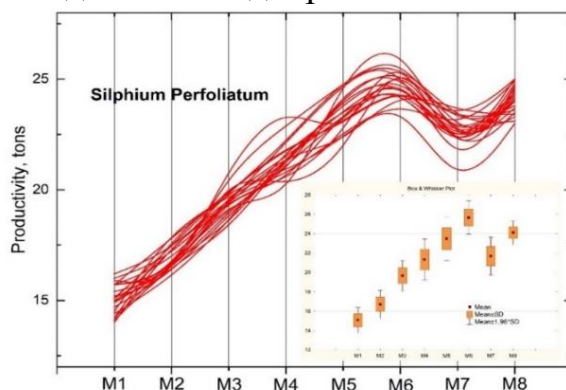


Рис. 13. Розподіл густини імовірностей продуктивності сільфії пронизанолистої (*Silphium perfoliatum* L) залежно від норми внесення ОСВ

(M1 – M8 – варіанти) та графічне зображення середнього значення (Mean); продуктивності сільфії, стандартна похибка дослідження (Mean SD) та 95-ти відсотковий довірчий інтервал (Mean 1.96 SD).

Аналіз кореляційних зв'язків між ключовими показниками продуктивності дозволяє зробити висновок, що кількісні характеристики рослин (такі як висота і густина стебел) суттєво впливають на продуктивність агрофітоценозів біоенергетичних культур (рис. 14).

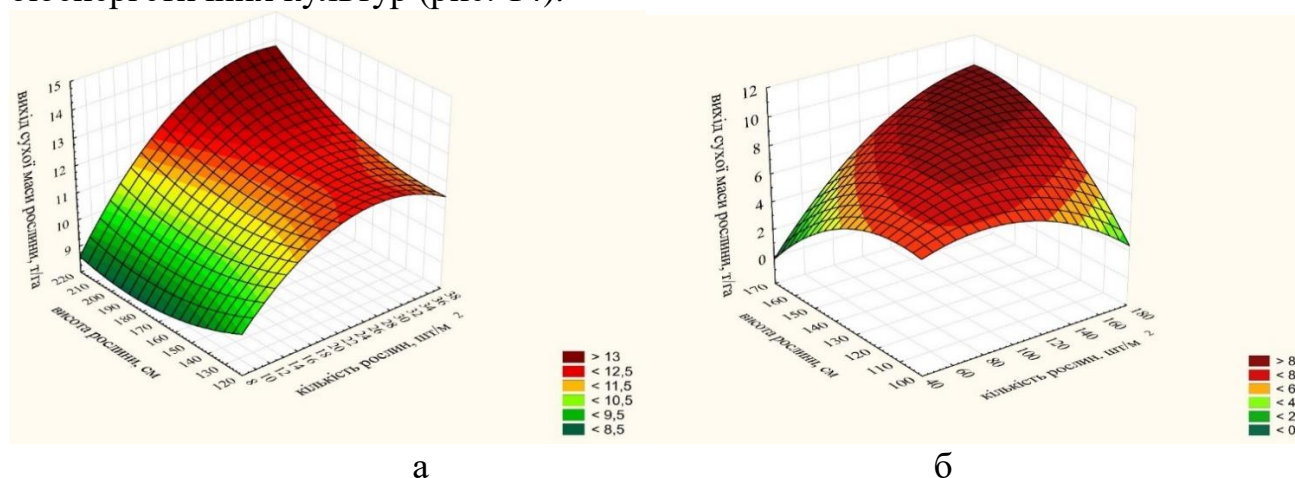


Рис. 14. Залежність між кількістю стебел і висотою рослин та продуктивністю міскантуса та світчграсу, середнє 2017 – 2022 рр.

Такі закономірності, виявлені у процесі досліджень стосовно росту і розвитку рослин різних енергетичних культур, що забезпечувало формування продуктивності на відповідних рівнях (табл. 2).

Форми застосування ОСВ (свіжий і компостований зі соломою у співвідношенні 3 : 1) за вирощування міскантуса, сприяло збільшенню продуктивності біомаси на 7,3 – 10,7 т/га порівняно з контролем (варіант 1). Внесення компостів у нормі 20 – 30 т/га та відповідних доз мінеральних добрив сприяло збільшенню продуктивності порівняно з внесенням мінеральних добрив (варіант 3) на 1,5 – 2,7 т/га. Культура світчграсу відзначалася такими показниками продуктивності на контролі 11,3 т/га та 15,2 – 18,9 т/га за внесення ОСВ у нормі 20 – 40 т/га. Внесення мінеральних добрив в нормі 60 – 90 т/га сприяло підвищенню продуктивності на 1,5 – 2,3 т/га, що у відсотках склало 11,8 – 27,6% (табл. 1).

Табл. 1. Формування продуктивності агрофітоценозами енергетичних культур за внесення ОСВ та компостів на його основі з органічними матеріалами, т/га, середнє за 2016 – 2022 рр.

Варіант досліджу	Енергетична культура, т/га				
	міскантус	світчграс	сильфія пронизанолиста	топінамбур (вегетативна маса)	топінамбур (бульби)
1	19,1	11,3	14,7	14,4	31,42
2	23,6	12,8	16,2	15,6	34,13
3	25,8	13,6	18,9	17,7	47,98
4	26,4	15,2	21,1	20,6	48,78
5	27,8	16,7	23,3	22,9	52,84
6	29,8	18,9	25,2	24,5	66,91
7	27,3	16,0	21,5	21,5	54,72

8	28,4	17,5	24	23,6	56,91
---	------	------	----	------	-------

Доцільно зауважити, що саме внесення свіжого ОСВ у нормі 40 т/га та N<sub>10</sub>P<sub>14</sub>K<sub>58</sub> (варіант 6) сприяло збільшенню продуктивності міскантуса до 29,8 т/га сухої речовини, а інших досліджуваних енергетичних культур за цієї ж норми удобрення забезпечувало дещо нижчий рівень продуктивності порівняно з цим показником – на 17,8% топінambuра, на 15,4% сільфії пронизанолистої та на 25,6% світчграсу.

Варто зауважити, що топінambuр це культура яка має корінь у формі бульбів і відповідно маса бульбів підвищувалась із збільшенням норм удобрення ОСВ. За внесення ОСВ у нормі 40 т/га та мінеральних добрив N<sub>10</sub> P<sub>14</sub> K<sub>58</sub> маса бульб топінambuра рівна 66,91 т/га, що перевищує контроль на 34 т/га.

Вирощування верби енергетичної за внесення ОСВ підвищило продуктивність у всіх варіантах окрім контрольного. Використання мінеральних добрив для збільшення вегетативної маси при повторному внесенні рівна 52,2 т/га, що склала на 11,1 т/га більше за контроль та 18,1 більше, ніж за першого циклу вирощування. Найінтенсивніший приріст вегетативної ваги у всіх можливих варіантах експерименту відбувався саме після повторного внесення добрив.

Найвищу продуктивність верби енергетичної (54,0 – 62,0 т/га) забезпечило внесення свіжого ОСВ. У цих варіантах показник продуктивності вегетативної маси на 12,9 – 20,9 т/га переважав аналогічний показник контрольного варіанта або на 15,4 – 21,5 т/га більше, ніж першого циклу використання плантації.

Найпродуктивнішими за виходом сухої біомаси верби енергетичної є варіанти з повторним внесенням ОСВ у дозі 80 т/га та компосту на основі ОСВ + тирса (3 : 1) – 60 т/га відповідно. За внесення ОСВ в дозі 80 т/га вміст сухої біомаси становив 39,4 т/га, за повторного внесення 52,6 т/га.

## **РЕВІТАЛІЗАЦІЯ НАФТОЗАБРУДНЕНИХ ГРУНТІВ ШЛЯХОМ ВИРОЩУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР**

В результаті виконаних досліджень встановлені певні закономірності нагромадження окремих важких металів у нафтозабрудненому підзолистому ґрунті за внесення добрив на основі ОСВ і його компостів. Під впливом збільшення доз ОСВ зростав уміст міцнозв'язаних форм важких металів у дерново-підзолистому нафтозабрудненому ґрунті. Найвищий показник умісту Pb, Cd, Ni і Co був у варіанті 5 з найвищою нормою внесення (80 т/га) ОСВ, який зростав порівняно з контрольним варіантом без внесення добрив на 57% для Pb, 54% – для Cd, на 81% – для Ni і 85% – для Co. Внесення компостів ОСВ і тирси (соломи) в нормах, визначених методикою досліджень, сприяло зростанню вмісту важких металів у ґрунті на рівні внесення свіжого ОСВ в нормах 40 – 60 т/га.

Внесення ОСВ впливало також на зміну вмісту рухомих сполук важких металів у ґрунті. Найвищі показники вмісту для усіх досліджуваних елементів були у варіанті 5, з внесенням найвищої норми ОСВ. Однак, частка рухомих сполук важких металів у міцнозв'язаному вмісті змінювалася не прямо пропорційно (табл. 2).

Частка рухомих сполук Pb у міцнозв'язаній формі на контрольному варіанті становила 28%, а у варіанті 5 – знижувалася до 23%. Загалом цей показник коливався



в межах 23 – 31%. Частка рухомих сполук Cd у міцнозв'язаному вмісті коливалася в діапазоні значень 32 – 41% і кореляційна залежність її вмісту від зростання норми внесення ОСВ була більше вираженою.

Таблиця 2

Вміст важких металів у нафтозабрудненому ґрунті за внесення ОСВ, мг/кг ґрунту

Варіанти	Міцнозв'язана форма				Рухома форма			
	Pb	Cd	Ni	Co	Pb	Cd	Ni	Co
1. Без добрив – контроль	14,01	0,66	26,36	22,91	3,91	0,21	1,11	2,09
2. N <sub>100</sub> P <sub>100</sub> K <sub>100</sub>	14,89	0,72	27,91	23,54	4,05	0,27	1,29	2,23
3. ОСВ – 40 т/га	18,06	0,86	28,67	24,98	4,98	0,31	1,51	2,47
4. ОСВ – 60 т/га	22,11	0,99	31,12	25,33	5,06	0,39	1,68	2,78
5. ОСВ – 80 т/га	24,57	1,21	32,41	26,84	5,78	0,44	1,76	2,91
6. Компост (ОСВ + тирса (3 : 1)) – 60 т/га	16,32	1,00	30,39	25,01	4,99	0,37	1,60	2,72
7. Компост (ОСВ + солома (3 : 1)) – 20 т/га	17,56	0,78	27,12	23,79	4,48	0,29	1,46	2,39
8. Компост (ОСВ + солома (3 : 1)) – 40 т/га	18,11	0,81	27,99	24,47	4,91	0,32	1,51	2,44
9. Компост (ОСВ + солома (3 : 1)) – 60 т/га	19,09	0,90	30,45	25,09	5,02	0,37	1,64	2,69
10. Компост (ОСВ + солома (3 : 1) + цементний пил 10 %) – 40 т/га	18,02	0,87	29,49	24,76	4,75	0,32	1,50	2,48
ГДК	30,0	3,0	85,0	50,0	6,0	0,7	4,0	5,0

Частка рухомих сполук Ni і Co була найнижчою у контрольному варіанті без внесення добрив – відповідно 4,2 і 9,1%. Однак, у варіантах, де вносили ОСВ у різних формах і нормах цей показник коливався в межах 5,1 – 5,4% Ni і 10 – 11% Co та практично не залежала від зростання норми внесення ОСВ. Найвищі показники вмісту важких металів у зеленій масі і кореневій системі рослин верби енергетичної зафіксовано у варіанті з найвищою нормою внесення ОСВ (варіант 5), а найнижчі – у контрольному варіанті без добрив. Внесення компостів з ОСВ зумовлювало нагромадження важких металів на рівні показників варіантів, де застосовували свіжий ОСВ у нормі 40 – 60 т/га. Збільшення дози внесення компостів зумовлювало підвищення вмісту важких металів у рослинах. Слід відзначити, що внесення компостів у нормі 20 т/га зумовлювало підвищення вмісту Pb, Cd і Ni у вегетативних органах, порівняно з кореневою системою. Крім цього варіанта (7), у всіх інших варіантах дослідження вміст важких металів у коренях переважав їх вміст у надземних органах. Це опосередковано підтверджує тезу, що вербу енергетичну можна використовувати для фіторе mediaції забруднених важкими металами територій, оскільки її рослини здатні акумулювати важкі метали переважно у кореневих системах.

Внесення ОСВ у нормах 40 – 80 т/га несуттєво впливає на співвідношення вмісту важких металів у вегетативній надземній масі до їх вмісту у коренях, оскільки це співвідношення в умовах дослідження коливалося в межах 0,85 – 0,96 і не залежало від зростання норми внесення ОСВ. Розрахунок Коефіцієнтів транслокації важких металів (Кт) показав, що внесення ОСВ зумовлює зниження цього показника для Pb з 16,7 у контрольному варіанті до 13,6 – 14,9 – у варіантах 3 – 5 з унесенням ОСВ.

Внесення компостів зумовлювало зростання цього показника до 15,9 – 16,2. У варіанті 10 з унесенням з компостом цементного пилу Кт був найвищим з усіх удобрених варіантів і на рівні контрольного варіанта. Транслокація Cd також знижувалася під впливом внесення ОСВ, причому з підвищенням норми ОСВ коефіцієнт знижувався з 8,6 до 6,5. Транслокація Ni зростала з підвищенням дози ОСВ в межах 17,5 – 25,9. Найвищий показник Кт зафіксовано у варіанті 10, де вносили з компостом цементний пил. Транслокація Co незначно залежала від норми і форми внесення ОСВ. Вона коливалася у незначному діапазоні значень показника Кт – 0,7 – 0,9. Однак, найвищий Кт був у варіанті, де вносили найвищу норму ОСВ.

На основі показників вмісту у ґрунті і рослинах Pb, Cd, Ni, Co розраховували Інтегральний показник забруднення агрофітоценозу верби енергетичної, який дозволяє оцінити ступінь небезпеки забруднення агроєкосистеми з урахуванням рівня небезпеки кожного елемента. У наших дослідженнях найвищим значенням Інтегрального показника забруднення рослинного покриву відзначався варіант з найвищою нормою внесення 80 т/га ОСВ (5) – 25,7. Також високі значення цього показника 22,2 відмічені у варіанті 10, де вносили компост (ОСВ + солома (3 : 1) + цементний пил 10 %) – 40 т/га. У варіантах, де вносили ОСВ у нормі 40 т/га ОСВ, а також компост у нормі 20 – 40 т/га (варіанти 7 і 8) зафіксовано найнижчі показники забруднення 13,0 – 17,1. Нижчі показники забруднення в умовах досліду були тільки у контрольному варіанті і варіанті з мінеральними добривами (варіант 2). Вирощування верби енергетичної на нафтозабруднених ґрунтах з внесенням ОСВ як добрив, зумовлює певне зростання вмісту Pb, Cd, Ni і Co у ґрунті.

Згідно проведених досліджень на нафтозабруднених ґрунтах, за внесення різних норм ОСВ, вміст плумбуму за вирощування міскантуса зростає за внесення ОСВ 40 т/га і  $N_{10}P_{14}K_{58}$  (варіант 6) і становить 4,30 мг/кг ґрунту. Проте, за вирощування світчграсу за внесення такої ж норми добрив, вміст плумбуму рівний 3,97 мг/кг ґрунту, що на 0,33 мг/кг ґрунту, становить менше за вирощування міскантуса. Коефіцієнти концентрації міцнозв'язаних форм плумбуму коливаються в межах 1,01 – 1,09 під час вирощування міскантуса. Коефіцієнт концентрації міцнозв'язаних форм кадмію змінюється в межах 1,09 – 1,56, максимальним залишається у варіантах за внесення ОСВ у нормі 40 т /га і  $N_{10}P_{14}K_{58}$ . Коефіцієнти концентрації в міцнозв'язаних форм плумбуму за вирощування світчграсу 20 – 40 т/га (варіант 4 – 6) рівні 1,02 – 1,15. Коефіцієнт концентрації міцнозв'язаних форм кадмію змінюється в межах 1,18 – 1,49.

Інтегральний показник забруднення ґрунтового покриву (рис. 10) відображає комплексну оцінку забруднення ґрунту важкими металами залежно від застосування різних норм і видів добрив порівняно з контрольним варіантом без внесення добрив.

З розрахунків видно, що в усіх варіантах, де вносили добрива у нормі з розрахунку  $N_{90}P_{90}K_{90}$  показник забруднення коливається в незначних межах 20 – 23, з тенденцією до підвищення у варіанті з найвищою нормою внесення ОСВ.

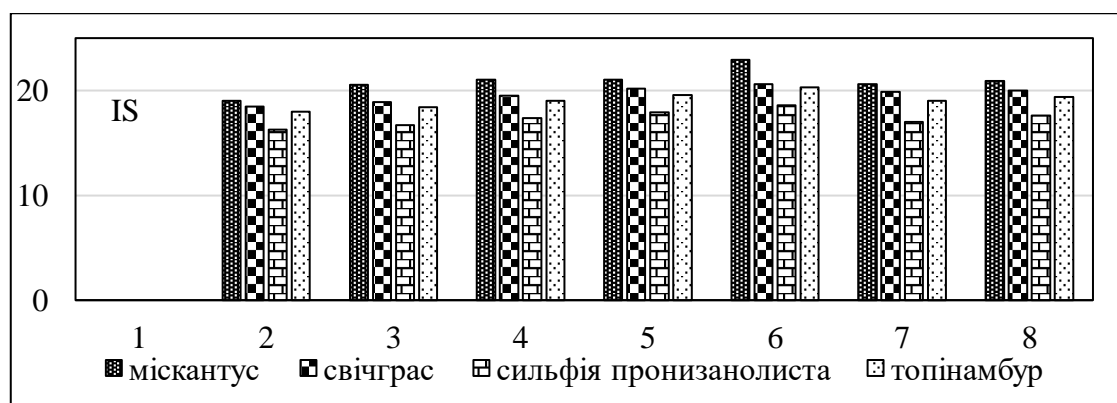


Рис. 10. Інтегральний показник забруднення ґрунтового покриття за внесення під енергетичні культури осаду стічних вод і його компостів з соломною.

Така особливість енергетичних культур (світчграс та міскантус), має велике значення для відтворення екологічної стійкості ґрунтового покриття. Тому їх доцільно застосовувати для рекультивації та ревіталізації нафтозабруднених ґрунтів.

### ЕКОНОМІЧНА ТА ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ОСАДУ СТИЧНИХ ВОД ЗА ВИРОЩУВАННЯ ФІТОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР

Оскільки варіанти внесення ОСВ безпосередньо впливали на зміну виходу валової енергії з врожаєм Сильфії пронизанолистої (*Silphium perfoliatum* L), регресійну модель виходу валової енергії можна описати за таким рівнянням:  $y = 23,392x + 210,84$  де  $y$  – це вихід валової енергії з врожаєм, ГДж/га;  $x$  – норми внесення ОСВ.

Множинний коефіцієнт детермінації становив  $R^2 = 0,76$ , що вказує на тісний зв'язок, між нормами внесення ОСВ та виходом валової енергії з врожаєм Сильфії пронизанолистої (*Silphium perfoliatum* L). За внесення свіжого ОСВ разом із мінеральними добривами вихід енергії підвищився і був найбільшим у варіанті, де вносили ОСВ у дозі 40 т/га та мінеральних добрив  $N_{10}P_{14}K_{58}$ – 386 ГДж/га.

За внесення компостів вихід енергії виявився меншим у порівнянні з варіантами, де використовували свіжий ОСВ, але водночас залишився більш високим у порівнянні з контролем без використання добрив. Основні параметри для визначення результативності процесу вирощування фітоенергетичних культур, зокрема культур які ми досліджуємо – це собівартість одиниці продукції та рентабельність створення продукції. Рентабельність вирощування енергетичних культур розбіжна через необхідність витрат трудових та матеріальних ресурсів на одиницю площі для отримання біомаси (табл. 3).

Досліджені фітоенергетичні культури є невибагливі до ґрунту, а також завдяки великій врожайності сухої біомаси (до 25 т/га), високій теплотворній здатності (5 кВт/год/кг або 18 МДж/кг) та низькій природній вологості стебел під час збирання (до 25%), порівняно з іншими енергетичними культурами.

Оскільки варіанти внесення ОСВ безпосередньо впливали на зміну виходу валової енергії з врожаєм світчграсу, регресійну модель виходу валової енергії

можна описати за таким рівнянням:  $y = 18,662x + 227,3$ , де  $y$  – це вихід валової енергії з врожаєм, ГДж/га;  $x$  – норми внесення ОСВ.

Табл. 3. Вихід енергії з отриманої біомаси енергетичних культур, середнє за 2020 – 2022 роки

Варіант досліджу	Енергетична культура, т/га			
	міскантус	світчграс	сильфія пронизанолиста	топінамбур
Контроль – без добрив	185,57	132,14	187,17	335,86
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	193,12	139,05	259,16	370,5
N <sub>90</sub> P <sub>90</sub> K <sub>90</sub>	199,84	146,82	318,35	431,07
ОСВ – 20 т/га + N <sub>50</sub> P <sub>52</sub> K <sub>74</sub>	197,32	155,09	305,55	446,65
ОСВ -30 т/га + N <sub>30</sub> P <sub>33</sub> K <sub>66</sub>	214,88	161,14	356,74	469,16
ОСВ – 40 т/га + N <sub>10</sub> P <sub>14</sub> K <sub>58</sub>	230,76	168,05	385,54	569,57
Компост (ОСВ + солома (3:1)) – 20 т/га + N <sub>50</sub> P <sub>16</sub> K <sub>67</sub>	208,31	164,09	347,95	512,44
Компост (ОСВ + солома (3:1)) – 30 т/га + N <sub>30</sub> K <sub>55</sub>	225,87	160,14	368,34	541,87

Множинний коефіцієнт детермінації становив  $R^2 = 0,77$ , що вказує на тісний зв'язок, між нормами внесення ОСВ та виходом валової енергії. Найвищий вихід сухої речовини забезпечує спільне внесення ОСВ і мінеральних добрив одночасно N<sub>10</sub>P<sub>14</sub>K<sub>58</sub> у нормі 40 т/га і становить 32,9 т/га, що на 13,5 т/га більше за контроль. Особливо, внесення свіжого ОСВ одночасно із мінеральними добривами вихід енергії підвищився і був найбільшим у варіанті, де вносили ОСВ у нормі 40 т/га разом з мінеральними добривами N<sub>10</sub>P<sub>14</sub>K<sub>58</sub> – 570 ГДж/га.

Оскільки варіанти внесення ОСВ безпосередньо впливали на зміну виходу валової енергії з біомасою топінамбура, регресійну модель виходу валової енергії можна описати за таким рівнянням:  $y = 30,831x + 320,9$ ; де  $y$  – це вихід валової енергії з врожаєм, ГДж/га;  $x$  – норми внесення ОСВ. Множинний коефіцієнт детермінації становив  $R^2 = 0,87$ , що вказує на високу тісноту зв'язку, між нормами внесення ОСВ та виходом валової енергії з врожаєм (рис. 11).

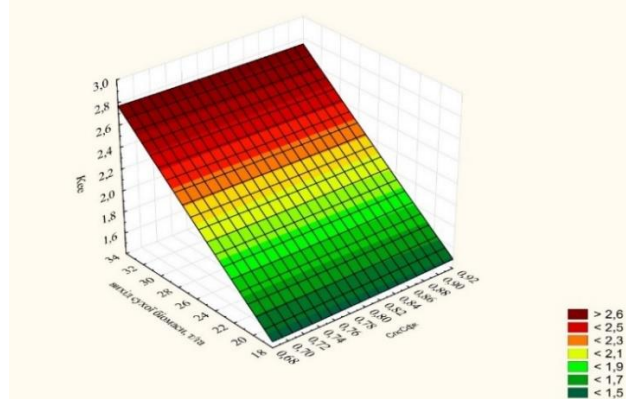


Рис. 11. Залежність коефіцієнта енергетичної ефективності від виходу сухої біомаси та запасів енергії в гумусі для світчграсу

Отже, із оцінки енергетичної ефективності вирощування фітоенергетичних

культур впливає, що економічно вигідно вирощувати енергетичні культури за.

Внесення ОСВ суттєво впливає на економічну та енергетичну ефективність вирощування фітоенергетичних культур. Коефіцієнти енергетичної ефективності, що знаходилися у діапазоні від 2,8 до 2,9, свідчать про важливу роль ОСВ у забезпеченні ефективного використання енергетичних ресурсів. Економічні переваги також не можуть бути недооцінені. Використання ОСВ сприяє оптимізації витрат на добрива та забезпечує відновлення ґрунтової фертильності, що в свою чергу позитивно впливає на врожайність культур. Найкращою формою використання ОСВ в умовах дослідів виявилось внесення комбінованих компостів ОСВ, інших органічних матеріалів та мінеральних добрив  $N_{10}P_{14}K_{58}$  у нормі 40 т/га.

Вихід валової енергії з одиниці площі під час вирощування енергетичної верби є досить значним при повторному внесенні свіжого ОСВ. Однак, необхідно враховувати екологічну загрозу високого вмісту важких металів у ґрунті, що перевищує гранично допустимі концентрації доцільно застосовувати повторно компости, створені з використанням (ОСВ) та соломи у співвідношенні 3 : 1 у нормі 20 – 40 т/га; Вихід валової енергії на одиницю площі під час вирощування сільфії пронизанолистої, міскантуса та світчґрасу високим за внесення свіжого ОСВ у нормі 40 т/га та компосту, з ОСВ та соломи у співвідношенні 3:1, у нормі 30 т/га;

За енергетичною ефективністю верба енергетична 2-го циклу використання забезпечила найкращі показники, а саме, значення коефіцієнтів енергетичної ефективності на діапазоні між 2,8 та 2,9.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення важливої наукової проблеми, яка полягає в розробці екологічно безпечних способів використання ОСВ комунального господарства в аграрному виробництві, зокрема вирощуванні енергетичних культур на низькопродуктивних дерново-підзолистих ґрунтах, а також техногенно уражених територіях, (в тому числі нафтопродуктами) для формування стійких агроєкосистем виробництва біомаси як сировини для відновлюваної енергетики з метою секвестрування вуглецю в ґрунтовому покриві та рослинних об'єктах і від'ємного балансу викидів парникових газів.

1. Осад стічних вод комунального господарства відзначається порівняно високим вмістом поживних речовин, зокрема макроелементів і азоту – 0,66%, фосфору – 2,51%, калію – 2,16%, та одночасно характеризується підвищеним вмістом важких металів, зокрема рухомих форм кадмію, міді та цинку, які перевищували ГДК в межах 14% (у відносних відсотках). Однак, завдяки компостуванню ОСВ з іншими органічними матеріалами (солома зернових культур, тирса деревних хвойних порід) вміст поллютантів в органічній масі значно зменшується до 13,8 мг/кг – кобальту; 33,5 мг/кг – нікелю; 1,5 мг/кг – кадмію; 13,1 мг/кг – свинцю, що дає змогу використовувати їх як добрива під нехарчові рослини.

2. Внесення осаду стічних вод та компостів на його основі істотно впливає на агроєкологічний стан дерново-підзолистого ґрунту, що проявляється у покращанні кислотно-основних властивостей ґрунту, зокрема зниженні вмісту обмінного водню і показника гідролітичної кислотності 2,88 – 2,90 ммоль/100 г ґрунту в орному (0 – 20 см) і підорному (20 – 40) шарах ґрунту, підвищенні вмісту

обмінних катіонів кальцію з 2,50 до 5,54 ммоль/100 г ґрунту та магнію з 0,26 до 0,41 ммоль/100 г ґрунту, зростанні співвідношення між кальцієм та магнієм з 9,61 до 13,51; підвищенні вмісту гумусу у ґрунті з 1,27% у контрольному варіанті до 1,37 – 1,43% у варіантах з найвищими дозами внесення ОСВ (підвищення дози ОСВ зумовлює збільшення частки пасивного гумусу, яка зростає з 1,4% у контрольному варіанті до 1,19 – 14,21% у варіанті, де вносили найвищі в досліді дози осаду стічних вод; зростанні частки гумінових кислот в гумусі гуматно-фульватного типу до 0,28 – 0,36% з одночасним зменшенням частки фульвокислот, підвищенні співвідношення Сгк: СФК з 0,7 до 0,9%.

3. Внесення ОСВ сприяє підвищенню азотного фонду дерново-підзолистого ґрунту, зокрема зумовлює підвищення вмісту різних фракцій азоту, а саме: амонійного – з 16 до 20 – 22 мг/кг ґрунту у верхньому шарі (0 – 20 см) ґрунту, нітратних сполук азоту в шарі 0 – 40 см з 1,70 до 2,52 – 2,64 мг/кг ґрунту. Ця тенденція позитивно позначається на зростанні вмісту азоту лужногідролізованих сполук – від 36,0 до 43,0 – 44,4 мг/кг ґрунту. Відношення вмісту лужногідролізованих сполук азоту до вмісту азоту мінеральних сполук в умовах досліду змінюється несуттєво, що опосередковано свідчить про відносно стабільний показник азотного статусу ґрунту, який незначно змінюється під впливом застосування ОСВ.

4. Застосування ОСВ суттєво впливає на зміну вмісту в ґрунті рухомих сполук фосфору та обмінних калію. Найвищий вміст рухомих сполук фосфору 186,5 мг/кг ґрунту у верхньому (0 – 20 см) шарі відзначали після внесення 40 – 60 т/га ОСВ з відповідною кількістю мінеральних добрив, що на 70 – 85 мг/кг ґрунту перевищувало показники контрольного варіанта. Вміст обмінних сполук калію також зростав у значних межах з 36,5 мг/кг – у контрольному до 110 – 120 мг/кг ґрунту у варіантах з найвищою дозою внесення ОСВ. До глибини 40 см вміст цих макроелементів суттєво зростає за умови внесення добрив з ОСВ. Проте з глибини 60 см їх вміст різко зменшується і наближається до початкових значень контрольного варіанта. Для калію різке падіння вмісту його рухомих сполук відбувається з глибини 40 см, хоча у верхніх шарах ґрунту (0 – 40 см) цей показник перевищує показник контрольного варіанта у 2,0 – 2,3 рази.

5. Повторне внесення ОСВ під час чергового циклу використання плантації верби енергетичної сприяє активізації біологічної активності дерново-підзолистого ґрунту. Найбільший позитивний вплив на біологічну активність ґрунту (71% розкладання лляного полотна за три місяці вегетації верби) забезпечила доза 60 т/га компостів на основі ОСВ і соломи, а найвищим ступенем розкладання лляної тканини відзначається верхній (0 – 20 см) шар ґрунту у всіх варіантах досліду. Повторне внесення мінеральних добрив за вирощування верби енергетичної істотно не впливає на показники біологічної активності ґрунту.

6. Внесення ОСВ під енергетичні культури (світчграс, міскантус, сільфію пронизанолисту та топінамбур) зумовлює активізацію біологічної активності дерново-підзолистого ґрунту. Найбільший позитивний вплив на біологічну активність ґрунту (60 – 64% розкладання лляного полотна за три місяці вегетації) забезпечує внесення ОСВ та мінеральних добрив у дозі 40 т/га, а найвищим ступенем розкладання лляної тканини відзначався верхній (0 – 20 см) шар ґрунту. Внесення мінеральних добрив істотно не впливає на показники біологічної активності ґрунту.

З підвищенням біопродуктивності дерново-підзолистих ґрунтів через внесення ОСВ як цінного органічного матеріалу фітотоксичність ґрунтового покриву зростає до рівня «вище середнього».

7. Вміст важких металів у дерново-підзолистому ґрунті у зеленій масі та кореневих системах енергетичних культур значно залежить від дози внесення ОСВ та компостів на його основі. Найвищий уміст важких металів спостерігали після внесення ОСВ у дозі 80 т/га та компосту на основі ОСВ і тирси (3 : 1) у дозі 60 т/га. Після внесення ОСВ у дозі 80 т/га уміст кадмію у зеленій масі верби енергетичної становить 1,71 мг/кг сухої речовини, нікелю – 1,57, свинцю та кобальту – 0,90 та 0,95 мг/кг відповідно. У кореневих системах рослин у цьому варіанті містилося 1,84 мг/кг кадмію, 1,67 – нікелю, 0,99 – свинцю та 1,08 мг/кг – кобальту. Відповідно, найменшим умістом важких металів відзначався варіант, де вносили компост (осад стічних вод + солома (3:1) – 20 т/га. Внесення під міскантус ОСВ у дозі 20 – 40 т/га та компостів зі соломою у співвідношенні 3 : 1 зумовлює певне підвищення у ґрунті вмісту міцнозв'язаних і рухомих форм важких металів порівняно варіантом без внесення добрив.

8. Коефіцієнти концентрації міцнозв'язаних форм важких металів у підзолистому ґрунті після внесення найвищої норми ОСВ зростають у ряді:  $\text{Co} \rightarrow \text{Pb} \rightarrow \text{Ni} \rightarrow \text{Zn} \rightarrow \text{Cu} \rightarrow \text{Cd}$ , а рухомих форм у ряді:  $\text{Cu} \rightarrow \text{Co} \rightarrow \text{Ni} \rightarrow \text{Pb} \rightarrow \text{Cd} \rightarrow \text{Zn}$ . Також внесення ОСВ сприяє транслокації важких металів у кореневих системах і надземних органах міскантуса у ряді:  $\text{Co} \rightarrow \text{Ni} \rightarrow \text{Pb} \rightarrow \text{Cu} \rightarrow \text{Zn} \rightarrow \text{Cd}$ , викликає певне підвищення внутрішньо-тканинного забруднення рослин переважною більшістю важких металів, крім Cd. Однак такий вплив є несуттєвим, оскільки інтегральний показник забруднення ґрунтового покриву у варіантах, де вносили різні види добрив у дозі, еквівалентній  $\text{N}_{90}\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ , коливається в незначних межах 20 – 23, з тенденцією до підвищення у варіанті з найвищою дозою внесення 40 т/га ОСВ та компенсаційною дозою мінеральних добрив. Внесення ОСВ під інші енергетичні культури зумовлювали подібні тенденції стосовно трансформації та переміщення важких металів у системі «ґрунт — рослина».

9. Внесення ОСВ сумісно з мінеральними добривами є ефективним способом підвищення продуктивності вегетативної маси у діапазоні значень 57 – 64% усіх досліджуваних енергетичних культур. Внесення ОСВ у дозі 40 т/га і  $\text{N}_{10}\text{P}_{14}\text{K}_{58}$  є порівняно недороговартісним способом підвищення продуктивності агрофітоценозів. Вміст елементів живлення у зеленій масі верби енергетичної, сільфії пронизанолистої зростає у ряді:  $\text{P} \rightarrow \text{K} \rightarrow \text{Ca} \rightarrow \text{N}$ . У зеленій масі свічграсу і міскантуса накопичення елементів живлення підвищується у ряді:  $\text{P} \rightarrow \text{Ca} \rightarrow \text{K} \rightarrow \text{N}$ ; топінамбура у ряді:  $\text{P} \rightarrow \text{Ca} \rightarrow \text{N} \rightarrow \text{K}$ . Найвищий вміст нітрогену у зеленій масі верби енергетичної спостерігали у варіанті після внесення у ґрунт компосту на основі ОСВ і соломи (3:1) у нормі 60 т/га, а у випадку внесення свіжого ОСВ відповідно у дозі 40 – 60 т/га вміст нітрогену варіює в діапазоні значень 1,92 – 1,95% відповідно. Найвищий вміст нітрогену, калію і кальцію у зеленій масі топінамбура є у варіанті внесення компосту на основі ОСВ у нормі 40 т/га і  $\text{N}_{10}\text{P}_{14}\text{K}_{58}$ . Найменший вміст елементів у зеленій масі верби відзначали у контрольному варіанті.

10. На нафтозабруднених ґрунтах Передкарпаття за внесення різних доз ОСВ, вміст п्लумбуму у вегетативній масі міскантуса зростає після внесення ОСВ

40 т/га і  $N_{10}P_{14}K_{58}$  і становить 4,30 мг/кг ґрунту. Однак така доза внесення ОСВ зумовлює нагромадження у фітомасі свічґрасу на рівні 3,97 мг/кг ґрунту.

11. Коефіцієнти концентрації міцнозв'язаних форм плюмбуму коливаються в межах 1,01 – 1,09 у рослинах міскантуса. Коефіцієнт концентрації міцнозв'язаних форм кадмію змінюється в межах 1,09 – 1,56, максимальним залишається у варіантах внесення ОСВ у дозі 40 т/га і  $N_{10}P_{14}K_{58}$ . Коефіцієнти концентрації міцнозв'язаних форм плюмбуму у випадку вирощування свічґрасу 20 – 40 т/га (варіант 4 – 6) рівні 1,02 – 1,15. Коефіцієнт концентрації міцнозв'язаних форм кадмію змінюється в межах 1,18 – 1,49. Залежність вмісту кадмію та плюмбуму в зеленій масі від вмісту досліджуваних металів у коренях свічґрасу та міскантуса та у дослідженому ґрунті вказує на високий кореляційний зв'язок між цими показниками; множинний коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,71 - 0,79$ .

12. Аналіз кореляційних залежностей вмісту важких металів у системі «ґрунт – рослина» дає можливість використовувати рослини свічґрасу та міскантуса як біоіндикатор забруднення довкілля нафтопродуктами. Коефіцієнти біологічного поглинання, плюмбуму у випадку вирощування міскантуса є меншими на 0,5 порівняно із вирощуванням свічґрасу після внесення ОСВ у нормі 20 г/га і  $N_{50}P_{52}K_{74}$ , однак коефіцієнти біологічного накопичення плюмбуму за вирощування міскантуса є вищими на 0,14. Коефіцієнт біологічного поглинання кадмію у випадку вирощування свічґрасу та міскантуса становить 336,67 та 288,33 відповідно (варіант 7).

13. Кадмій та плюмбум належать до 1 групи за інтенсивністю біологічного поглинання і є елементами енергійного накопичення важких металів. Така особливість енергетичних культур (зокрема свічґрасу та міскантуса), має велике значення для відтворення екологічної стійкості ґрунтового покриву, тому їх варто застосовувати для рекультивації та ревіталізації нафтозабруднених ґрунтів.

14. Економічні розрахунки та оцінка енергетичної ефективності вирощування фітоенергетичних культур вказують на найкращий економічний ефект від внесення компостів на основі ОСВ та мінеральних добрив  $N_{10}P_{14}K_{58}$ .

15. Вихід міцнозв'язаних її енергії з одиниці площі – верби енергетичної досить високий за повторного внесення свіжого ОСВ у дозі 40 т/га, але, з огляду на екологічну небезпеку підвищення вмісту важких металів у ґрунті понад ГДК, для цього доцільно застосовувати компости на основі ОСВ та соломи (3 : 1) у дозі 20 – 40 т/га. Вихід міцнозв'язаних енергії з одиниці площі – сильфії пронизанолистої, міскантуса та свічґрасу є найвищим після внесення свіжого ОСВ у дозі 40 т/га та компостів на його основі з соломою (3 : 1) у дозі 30 т/га.

Отже, вирощування фітоенергетичних культур з початковим внесенням ОСВ у дозі 40 т/га, а також компосту на основі ОСВ і соломи (3 : 1) у дозі 30 т/га забезпечує найкращі коефіцієнти енергетичної ефективності: на рівні 2,5 – 2,7 для топінамбура, 2,8 – 2,9 – для верби енергетичної 2-го циклу використання та інших фітоенергетичних культур.

## РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ

1. Для покращення фізико-хімічних властивостей дерново-підзолистого ґрунту доцільно використовувати ОСВ у нормі 60 т/га та компости на основі ОСВ і тирси (3 : 1) у дозі 60 т/га.



2. Для ревіталізації нафтозабруднених ґрунтів доцільно використовувати ОСВ у дозі 40 т/га та  $N_{10}P_{14}K_{58}$  (для підвищення основних агрохімічних показників, зменшення фітотоксичного ефекту, зменшення у профілі ґрунту кількості політантів) та рекомендовано вирощувати енергетичні культури для отримання біомаси: верба енергетична, міскантус.

Рекомендовано вносити компости ОСВ + солома (3 : 1) – 30 т/га +  $N_{30}K_{55}$ . для збільшення продуктивності енергетичних культур в межах 30 – 40% доцільно вносити компости на основі ОСВ та соломи (3 : 1) у дозі 30 т/га +  $N_{30}K_{55}$  та свіжий ОСВ у дозі 40 т/га для світчґрасу, міскантуса, сільфії пронизанолистої та топінамбура.

Для збільшення біомаси верби енергетичної на 60% порівняно з контрольним варіантом рекомендовано вносити свіжий ОСВ та компости із соломою та тирсою у співвідношенні 3 : 1 у дозі 60 т/га.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ: СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ Монографії:

1. Lopushniak V., **Hrytsuliak H.** (2023). Change in the humus state of aluvisol due to implementation of sediment of sewage sludge under the energy willow. *Technical and agricultural sciences in modern realities: problems, prospects and solutions* : Collective monograph. Boston, P. 278 – 297. Режим доступу DOI: 10.46299/isg.2023.mono.tech.2.5.1 (Особистий внесок – 70%, виконання експериментальних досліджень, статистичний аналіз результатів, підготовка до видання публікації).

2. Lopushniak V., **Hrytsuliak H.** (2023). Influence of sediment of wastewater on the change of agro-ecological indicators of a sod-pedosal soil under energy willow. Prospective and priority directions of scientific research in technical and agricultural sciences. Collective monograph. Boston, P. 159 – 190. Режим доступу DOI:10.46299/ISG.2023.mono.tech.3.3.1 (Особистий внесок – 60%, виконання експериментальних досліджень, статистичний аналіз, редакційна підготовка до публікації).

### Статті в наукових фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science:

3. Lopushniak V., **Hrytsuliak H.** (2021). The models of the heavy metal accumulation of the multiple grain energy cultures for wastewater deposition on oil-polluted degraded soils. *Ecological engineering and environmental technology*. Vol. 22 (4). P. 9 – 17. Режим доступу DOI: 10.12912/27197050/137873 (Scopus) (Особистий внесок – 40%, виконання експериментальних досліджень та їх статистичний аналіз результатів).

4. Lopushniak V., **Hrytsuliak H.**, Bykin A., Bordyuzha N., Semenko L., Polutrenko M., Kotsyubynska Yu. (2021). Prognostic models of panicum virgatum l. using artificial neural networks. *Journal of Ecological Engineering*. Vol. 22 (11). P. 62 – 71. Режим доступу DOI: [10.12911/22998993/142958](https://doi.org/10.12911/22998993/142958) (Scopus) (Особистий внесок – 50%, аналіз результатів, формування висновків).

5. Lopushniak V., **Hrytsuliak H.** (2021). The Intensity of the heavy metals by topinambur in the conditions of the oil-polluted areas. *Iraqi Journal of Agricultural*

*Sciences*. Vol. 52 (6). P. 1334 – 1345. Режим доступу DOI: 10.36103/ijas.v52i6.1473. (Scopus) (Особистий внесок – 50%, виконання експериментальних досліджень, їх аналіз та формування висновків).

6. Lopushniak V., **Hrytsuliak H.**, Kotsyubynsky A., Lopushniak G. (2021). Forecasting the Productivity of the Agrophytocenoses of the *Miscanthus Giganteus* for the Fertilization Based on the Wastewater Sedimentation. *Ecological Engineering and Environmental Technology*. Vol. 22 (3). P. 11 – 19. Режим доступу DOI: 10.12912/27197050/134867. (Scopus) (Особистий внесок – 40%, аналіз результатів та статистична обробка результатів).

7. Lopushnyak V., **Hrytsuliak H.**, Gamayunova V., Kozan N., Zakharchenko E., Voloshin Yu., Lopushniak H., Polutrenko M., Kotsyubynska Yu. (2022). Dynamics of macro elements content in eutric podzoluvisols for separation of wastewater under jerusalem artichokes. *Journal of Ecological Engineering*. Vol. 23 (4). P. 33 – 42. Режим доступу DOI: 10.12911/22998993/146268. (Scopus) (Особистий внесок – 40%, аналіз літературних джерел та формування висновків).

8. **Hrytsuliak H.**, Lopushniak V., Polutrenko M., Poberezhna L., Gamayunova V., Pikovska O, Tonkha O, Jakubowski T, Kotsyubynska Y. (2022). Productivity model of herbal bioenergy cultures depending on biometric indicators of overhead mass. *Ecological Engineering and Environmental Technology*. Vol. 23 (2). P. 162 – 172. Режим доступу DOI: 10.12912/27197050/145731 (Scopus) (Особистий внесок – 40%, аналіз джерел літератури та статистична обробка результатів досліджень).

9. Lopushnyak V., **Hrytsuliak H.**, Polutrenko M., Plevinskis P., Tonkha O., Pikovska O., Bykina N., Karabach Y. (2022). Accumulation of heavy metals in silphium perfoliatum L. for the cultivation of oil-contaminated soils. *Ecological Engineering and Environmental Technology*. Vol. 23 (3). P. 30 – 39. Режим доступу DOI: 10.12912/27197050/147145 (Scopus) (Особистий внесок – 30%, виконання експериментальних досліджень, підготовка до публікації матеріалу).

10. Lopushnyak V., **Hrytsuliak H.**, Kozova I., Jakubowski T., Kotsyubynska Yu., Polutrenko M., Kozan N. (2022). Biological absorption of chemical elements in topinambur plants by separation of wastewater in podzol soil. *Journal of Ecological Engineering*. Vol. 23 (9). P. 18 – 24. Режим доступу DOI: 10.12911/22998993/150648. (Scopus) (Особистий внесок – 20%, аналіз результатів досліджень).

11. Lopushnyak V., **Hrytsulyak H.**, Voloshyn Yu., Lopushniak H., Baran B. (2022). Bioaccumulation and translocation of heavy metals in tropical plants during sewage sediment in podzols soils. *Ecological Engineering and Environmental Technology*. Vol. 23 (6). P. 178 – 187. Режим доступу DOI: [10.12912/27197050/152919](https://doi.org/10.12912/27197050/152919) (Scopus) (Особистий внесок – 20%, отримання експериментальних даних, статистична обробка результатів).

12. Lopushniak V., **Hrytsuliak H.**, Polutrenko M., Kotsyubynska Y., Baran B. (2022). Model of biomass productivity under the influence of change in the phytotoxicity of podzol soil due to reintroduction of sewage sludge under energy willow. *Journal of Ecological Engineering*. Vol. 23 (12). P. 217 – 226. Режим доступу DOI: 10.12911/22998993/154773 (Scopus) (Особистий внесок – 50%, виконання експериментальних досліджень, аналіз літературних джерел).

13. Chelyadyn L., Marushchak U., Novosad P., **Hrytsuliak G.**, Ribun V., Chelyadyn V. (2022). Transformation of technogenic waste based on water treatment sludge into

granulated fertilizer. *Questions of chemistry and chemical technology*. Vol. 4. P. 92 – 101. Режим доступу DOI: 10.32434/0321-4095-2022-143-4-92-101 (Scopus) (Особистий внесок – 40%, виконання експериментальних досліджень, аналіз літературних джерел).

14. Lopushniak V., **Hrytsuliak H.**, Jakubowski T., Voloshyn Yu., Karavanovych K., Kachala T. (2023). Indices of soil and plant cover pollution due to re-introduction of sediment water under the energy willow on aluvisol of Ukraine. *Ecological Engineering and Environmental Technology*. Vol. 24 (3). P. 201 – 211. Режим доступу DOI: [10.12912/27197050/160095](https://doi.org/10.12912/27197050/160095) (Scopus) (Особистий внесок – 40%, виконання експериментальних досліджень та аналіз результатів досліджень).

15. Lopushnyak V., **Hrytsulyak H.**, Lopushniak H., Voloshyn Y. (2023). Integral assessment of pollution of sod-podzolic soils by application of sewage sludge under miscanthus x giganteus. *International Journal of Environmental Studies*. Vol. 80 (2). P. 476 – 487. Режим доступу DOI: [10.1080/00207233.2022.2147725](https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2147725) (Scopus) (Особистий внесок – 40%, виконання експериментальних досліджень, статистичний аналіз результатів).

16. Lopushniak V., **Hrytsuliak H.**, Voloshin Y., Lopushniak H., Bogoslavets V., Kalyn T., Kotsyubynsky A., Chupa V. (2023). Statistical analysis of the productivity of phytocoenoses of energy cultures due to implementation of wastewater sediment on aluvisols of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*. Vol. 24 (9). P. 192 – 201. Режим доступу DOI: [10.1080/00207233.2022.2147725](https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2147725) (Scopus) (Особистий внесок – 40%, аналіз результатів та написання статті).

17. Lopushniak V., **Hrytsulyak H.**, Gumentyk M., Kharytonov M., Barchak B., Jakubowski T. (2021). The Formation of the eaf surface area and biomass of the miscanthus giganteus plants depending on the sewage sludge rate. *Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2021)* E3S Web of Conferences 280, 06009. P. 1 – 7. Режим доступу DOI: [10.1051/e3sconf/202128006009](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128006009) (Особистий внесок – 30%, виконання експериментальних досліджень, статистична обробка результатів).

18. Lopushniak V., **Hrytsulyak H.** (2022). Translocation of heavy metals (Pb, Cd, Ni, Co) in energy willow plants growing on oil-contaminated subsoil soils. *XVI International Scientific Conference «Monitoring of geological processes and ecological condition of the environment»* 15 – 18 November 2022. Kyiv. P. 1 – 5. Режим доступу DOI: [10.3997/2214-4609.2022580128](https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580128) (Scopus) (Особистий внесок – 40 %, виконання експериментальних досліджень, аналіз результатів, аналіз літературних джерел).

19. Лопушняк В., **Грицуляк Г.**, Лопушняк Г., Тонха О., Меньшов О., Піковська О. (2021) Вміст важких металів у ґрунтах нафтозабруднених територій Передкарпаття. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Сер. Геологія*. Вип. 2 (93). С. 83 – 88. (Scopus) (Особистий внесок – 40%, виконання експериментальних досліджень та аналіз результатів).

#### Статті в іноземних виданнях:

20. Lopushniak V., **Hrytsuliak H.**, Lopushniak G. (2021). Statistical Analysis of the experimental data on the content of heavymetals in sod-podzolic soils, depending on the introduction of sewage sludge under energy willow. *International Journal of Advance and Innovative Research*. Vol. 8 (4). P. 346 – 352. (Особистий внесок – 50%, виконання експериментальних досліджень).

21. **Hrytsuliak H.**, Lopushniak V. (20218). Influence Fertilizer sewage sludg on the size harvest topinambour. *Acta Carpathica. Rzeszow*. Vol. 23 (12). P. 217 – 226. Режим доступу DOI: 10.12911/22998993/154773 (Особистий внесок – 70%, виконання експериментальних досліджень та їх статистичний аналіз, формування висновків).

22. Lopushniak V., **Hritsuliak H.** (2020). Environmental soil conditions for entering sewage sludge under energy crops. *Proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference. International Trends in Science and Technology*. Vol.1. 28 february 2020. Warsaw, Poland. P. 57 – 59. (Особистий внесок – 50%, аналіз результатів, аналіз літературних джерел).

#### **Статті у наукових фахових виданнях України:**

23. Лопушняк В., Якубовський Т., **Грицуляк Г.** (2018). Продуктивність топінамбура залежно від норми застосування осаду стічних вод на дерново-підзолистих ґрунтах Передкарпаття. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Агронія. 2018*. Вип. 22 (2). С. 119 – 123. (Особистий внесок – 50%, виконання експериментальних досліджень, аналіз результатів, формування висновків).

24. **Грицуляк Г.** (2019). Екологічний стан дерново-підзолистих ґрунтів Передкарпаття за внесення осаду стічних вод під вербу енергетичну. *Збалансоване природокористування*. №1. С. 66 – 75. Режим доступу DOI: 10.33730/2310-4678.1.2019.170592

25. Лопушняк В., **Грицуляк Г.**, Якубовські Т., Барчак Б., Сав'юк Р. (2020). Формування продуктивності верби енергетичної за повторного внесення осаду стічних вод на дерево-підзолистому ґрунті. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2020. № 2. С. 63 – 70. (Особистий внесок – 60%, виконання експериментальних досліджень, аналіз результатів, аналіз літературних джерел, підготовка та написання статті).

26. Лопушняк В., **Грицуляк Г.** (2020). Вплив осаду стічних вод на агрохімічні властивості та продуктивність дерново-підзолистого ґрунту. *Вісник ХНАУ*. 2020 № 1. С. 201 – 213. (Особистий внесок – 70%, аналіз літературних джерел та виконання експериментальних досліджень, статистичний аналіз результатів).

27. Лопушняк В., **Грицуляк Г.** (2020). Формування продуктивності сильфії пронизанолистої (*Silphinium Perfliatum L.*) за різних норм внесення осаду стічних вод на дерново-підзолистих ґрунтах Передкарпаття. *Збалансоване природокористування*. 2020. № 3. С. 100 – 108. (Особистий внесок – 60%, виконання експериментальних досліджень та їх аналіз, формування висновків).

28. Лопушняк В., **Грицуляк Г.**, Джус Г. (2021). Біоенергетична оцінка внесення осаду стічних вод під сильфію пронизанолисту (*Silphium perfoliatum L.*) на дерново-підзолистих ґрунтах Передкарпаття. *Агроекологічний журнал. Сер. Агронія*. 2021. № 1. С. 126 – 134. Режим доступу DOI: 10.33730/2077-4893.1.2021.227249 (Особистий внесок – 40%, виконання експериментальних досліджень, аналіз результатів).

29. Лопушняк В., **Грицуляк Г.** (2021). Зміна основних агрохімічних показників дерново-підзолистого ґрунту за внесення осаду стічних вод під топінамбур. *Рослинництво та ґрунтознавство*. №12 (3). С. 66 – 75. (Особистий внесок – 60%, виконання експериментальних досліджень).

#### **Публікації в інших наукових виданнях**



30. Лопушняк В., **Грицуляк Г.** (2018). Рациональний спосіб рекультивації порушених і техногенних ґрунтів. *Вчені Львівського національного аграрного університету виробництву : каталог інноваційних розробок / за заг. ред. В. В. Снітинського, І. Б. Яціва. Вип. 18. Львів: Львівський національний аграрний університет. С. 6. (Особистий внесок – 50%, виконання експериментальних досліджень, аналіз результатів, редакційна підготовка публікації).*

31. Лопушняк В., Якубовські Т., **Грицуляк Г.**, Шпик Н. (2018). Екологічна модель рекультивації деградованих дерново-підзолистих ґрунтів Передкарпаття. *Вчені Львівського національного аграрного університету виробництву : каталог інноваційних розробок / за заг. ред. В. В. Снітинського, І. Б. Яціва. Вип. 18. Львів : Львівський національний аграрний університет. 2018. С. 7. (Особистий внесок – 40%, аналіз літературних джерел, підготовка матеріалу до видання згідно вимог).*

32. Лопушняк В., Якубовський Т., **Грицуляк Г.** (2018). Продуктивність топінамбура залежно від норми застосування осаду стічних вод на дерново-підзолистих ґрунтах Передкарпаття. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Агронія. №22 (2). С. 119 – 123. (Особистий внесок – 50%, аналіз джерел літератури, виконання експериментальних досліджень та їх аналіз).*

33. Лопушняк В., Барчак Б., Якубовський Т., **Грицуляк Г.** (2020). Продуктивність топінамбура на опідзолених деградованих ґрунтах. «*Біоенергетика Bioenergy*». 1 (15). С. 7 – 11. (Особистий внесок – 40%, виконання експериментальних досліджень, аналіз результатів).

34. Лопушняк В., **Грицуляк Г.** (2020). Інтенсивність засвоєння важких металів рослинами верби енергетичної на нафтозабруднених територіях. *Science, research, development: Monografia po konferencyj na Poznan, Poland, С. 27 – 29. (Особистий внесок – 60%, аналіз літературних джерел, виконання експериментальних досліджень та їх аналіз, підготовка матеріалів до видання).*

#### **Матеріали конференцій і тези наукових доповідей:**

35. **Грицуляк Г.** (2017). Система біотестування дерново-підзолистого ґрунту забрудненого важкими металами під впливом внесення удобрення на основі осаду стічних вод. [електронний ресурс]. «*Актуальні проблеми ґрунтознавства, землеробства та агрохімії*» : зб. матеріалів Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, присвяченої Міжнародному Дню агрохіміка Львів. С. 347 – 353. Режим доступу: <http://lnau.lviv.ua/lnau/index.php/uk/konf.html>

36. **Грицуляк Г.** (2017). Динаміка врожаю бульб топінамбура залежно від норми внесення осаду стічних вод на дерново-підзолистих ґрунтах Передкарпаття : зб. матеріалів *Всеукраїнського науково-практичного круглого столу для молодих вчених*. Харків. С. 42 – 45.

37. Лопушняк В., **Грицуляк Г.** (2019). Транслокація важких металів у ланці ґрунт-верба енергетична як чинник екологічної безпеки біоенергетичних систем «*Актуальні наукові дослідження в сучасному світі*» : зб. матеріалів Міжнародної XLVI наукової конференції. Переяслав-Хмельницький. С. 108 – 115. (Особистий внесок – 60%, виконання експериментальних досліджень, підготовка та написання тез).

38. **Грицуляк Г.**, Лопушняк В. (2019). Моніторинг екологічного стану ґрунтового покриву за внесення осаду стічних вод під енергетичні культури. «*Актуальні проблеми сучасної хімії*» : зб. матеріалів III Всеукраїнській науково–

практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Миколаїв. С. 132 – 136. *(Особистий внесок – 60%, аналіз результатів та літературних джерел).*

39. **Грицуляк Г.** (2019). Вплив внесення удобрення на основі осаду стічних вод під топінамбур на еколого-токсичний стан дерново-підзолистого ґрунту. *«Сучасний рух науки»* : зб. матеріалів VIII міжнародної науково-практичної інтернет-конференції Дніпро. Т.1. С. 468 – 471. *(Особистий внесок – 100 %, виконання експериментальних досліджень, їх аналіз, формування висновків).*

40. Полутренко М., **Грицуляк Г.**, Коцюбинський А., Сав'юк Р. (2020). Технологія перероблення вегетативної маси рослини силфії пронизанолистої. *«Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування»* : зб. Матеріалів VI міжнародного конгресу Львів. С. 206. *(Особистий внесок – 50 %, аналіз літературних джерел та висновків).*

41. Lopushniak V., **Hrytsuliak H.** (2020). Environmental soil conditions for entering sewage sludge under energy crops. *International Trends in Science and Technology : Proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference. Warsaw. № 1.* P. 57 – 60. *(Особистий внесок – 60 %, виконання експериментальних досліджень, підготовка та написання тез).*

42. Лопушняк В., **Грицуляк Г.** (2020). Інтенсивність засвоєння важких металів рослинами верби енергетичної на нафтозабруднених територіях *Science, research, development : Monografia ро конференцуйна, Poznan, 2020. № 26.* P. 29 – 34. *(Особистий внесок – 60%, аналіз результатів досліджень і написання тез).*

43. Лопушняк В., Полутренко М., **Грицуляк Г.**, Калин Т., Коцюбинський А. (2021). Нагромадження кадмію та плюмбуму в енергетичних культурах на нафтозабруднених деградованих ґрунтах. *Actual trends of modern scientific research : Abstracts of the 11th International scientific and practical conference. MDPC Publishing. Munich.* P. 14 – 21. *(Особистий внесок – 50%, виконання експериментальних досліджень, обробка статистичних даних та написання тез).*

44. Lopushniak V., **Hrytsuliak H.** (2021). Ecological condition of the sod-podzolic soil for the introduction of the sewage sludge under the energy willow. *Science and education: problems, prospects and innovations : Abstracts of V international scientific and practical conference. Kyoto.* P. 4 – 6. *(Особистий внесок – 70 %, формування висновків, підготовка та написання тез).*

45. Polutrenko M., **Hrytsuliak H.**, Lopushniak V., Kotsyubynsky A., Savyuk R. (2021). Method of processing of terrestrial part of plants. *European scientific discussions : Abstracts of V international scientific and practical conference. Rome.* P. 1 – 3. *(Особистий внесок – 50%, аналіз літературних джерел та написання тез).*

46. Lopushniak V., **Hrytsuliak H.** (2021). Agrochemical properties of sod-podzolic soil for fertilizer application during the cultivation of cup plant silphium perfoliatum. *Achievements and prospects of modern scientific research : Abstracts of III International scientific and practical conference. Buenos Aires.* P. 7 – 9. *(Особистий внесок – 60%, виконання експериментальних досліджень та статистична обробка).*

47. Lopushniak V., **Hrytsuliak H.**, Lopushniak G. (2021). Statistical analysis of the experimental data on the content of heavy metals in sod-podzolic soils, depending on the introduction of sewage sludge under energy willow. *Indian academicians and researchers association : International e-Conference on Research and Development in Science, Technology and management in the Current Era. India.* P. 33 – 41. *(Особистий внесок –*

60%, аналіз результатів досліджень, підготовка та написання тез).

48. Lopushniak V., **Hrytsuliak H.**, Chupa V., Fedorko N. (2021). Overview of the Current. «Агрохімічні ресурси та управління біопродуктивністю агроландшафтів» : зб. матеріалів міжнародної науково-практичної конференції Київ. С. 79 – 89. (Особистий внесок – 50%, виконання експериментальних досліджень та підготовка тез).

49. Lopushniak V., **Hrytsuliak H.**, Fedorko N., Jakubowski T., Barchak B. (2021). Pollution of Water resources of Ivano-Frankyvsk Areas of Heavy Metal Salts. «Агрохімічні ресурси та управління біопродуктивністю агроландшафтів»: зб. матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Київ. С. 101 – 114. (Особистий внесок – 30%, виконання експериментальних досліджень, аналіз результатів та написання тез).

50. Лопушняк В., **Грицуляк Г.**, Коцюбинський А. (2021). Вміст важких металів у енергетичних культурах за внесення осаду стічних вод на нафтозабруднених деградованих ґрунтах. «Агрохімічні ресурси та управління біопродуктивністю агроландшафтів» : зб. матеріалів міжнародної науково-практичної конференції Київ. С. 40 – 48. (Особистий внесок – 50%, аналіз літературних джерел та висновків, підготовка та написання тези).

51. Lopushnyak V., Polutrenko M., **Hrytsulyak H.**, Voloshin Y. (2022). The Content of Heavy Metals in Plants During Cultivation on Oil-Contaminated Soils. World science priorities : The I International Scientific and Practical Conference. Viena. P. 5 – 11. (Особистий внесок – 40%, виконання експериментальних досліджень та написання тез).

53. Polutrenko M., **Hrytsulyak H.**, Chupa K. (2022). Disposal and Recovery of Used Transformer Oils. *Promising ways of solving scientific problems* : The IX International Scientific and Practical Conference. Belgium. Brussels. P. 199 – 201. (Особистий внесок – 70%, аналіз результатів та висновків, підготовка тез).

54. Лопушняк В., **Грицуляк Г.** (2022). Міграція важких металів в системі ґрунт – рослина на нафтозабруднених територіях. «Сталий розвиток : захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» : зб. наукових праць VI міжнародного молодіжного конгресу. Львів. С. 73. (Особистий внесок – 60%, аналіз літературних джерел та формування висновків).

55. Lopushniak V., **Hrytsuliak H.**, Baran B. (2022). Prospects of Using Bioenergy Cultures for Phytoremediation of Turn-Podzole Oil-Polluted Soils. *Science, trends and perspectives of developmen* : Abstracts of VII International Scientific and Practical Conference. Budapest. P. 14 – 21. (Особистий внесок – 50%, аналіз літературних джерел та написання тез).

56. Lopushnyak V., **Hrytsulyak H.**, Polutrenko M., Baran B., Fedorko N., Felyk K. (2023). Comprehensive Assessment of Pollution of Sod-Podzolic Soils. *Scientific research in the modern world* : Proceedings of VI International Scientific and Practical Conference. Toronto. P. 12 – 26. (Особистий внесок – 50%, виконання експериментальних досліджень, аналіз літературних джерел та написання тез).

57. Chupa V., Chupa K., **Hrytsulyak H.**, Karavanovych K. (2023). Study of the calorie value of solid domestic waste mixtures. «*The research process in science and the implementation of results*» : Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference. Maribor. P. 95 – 102. (Особистий внесок – 50%, формування результатів

дослідження, підготовка та написання тез).

58. Лопушняк В., Грицуляк Г., Федорко Н., Караванович Х. (2023). Вплив нафтопродуктів на ґрунти Івано-Франківської області. *Methodological and attitudinal principles of classical science* : Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference. Stockholm. P. 39 – 42. (Особистий внесок – 40%, виконання експериментальних досліджень, аналіз результатів).

59. Лопушняк В., Грицуляк Г., Фелик К. (2023). Забруднення Cd, Pb та Co підзолистих ґрунтів. *Innovative ways of learning development* : Abstracts of X International Scientific and Practical Conference, Varna. P. 262 – 271. (Особистий внесок – 40%, аналіз результатів досліджень та написання тез).

60. Lopushniak V., Hrytsuliak H., Polutrenko M., Baran B., Fedorko N. (2023). Contamination of Underground Soils by the Contribution of Sewage Sludge Under *Miscanthus Giganteus*. «*Current questions of modern science*» : зб. наукових праць III Міжнародно-науково-практичної конференції. Івано-Франківськ, 2023. С. 5 – 11. (Особистий внесок – 50%, аналіз та обробка результатів та написання тез).

#### Патенти на корисну модель:

61. Лопушняк В., Грицуляк Г. Спосіб вирощування верби енергетичної: патент на корисну модель. 127570 Україна : МПК А01В 79/00 А01С 21/00; № и 201802371 ; заявл. 12.03.2018 ; опубл. 12.08.2018, Бюл. 15.

62. Лопушняк В., Грицуляк Г. Спосіб покращання гумусового стану опідзолених ґрунтів за вирощування енергетичних культур : патент на корисну модель. 146230 Україна : МПК А01С 21/00 А01С 21/00; № и 2020 01523 ; заявл. 03.03.2020 ; опубл. 03.02.2021, Бюл. № 5.

63. Лопушняк В., Грицуляк Г. Спосіб удобрення верби енергетичної з використанням цементного пилу: патент на корисну модель. 146292 Україна : МПК А01С 21/00 А01С 21/00; № и 2020 01265 ; заявл. 26.02.2020 ; опубл. 10.02.2021, Бюл. № 6.

64. Лопушняк В., Грицуляк Г., Полутренко М., Караванович Х. Спосіб фіторемедіації ґрунту забрудненого відходами буріння та нафтопродуктами : патент на корисну модель. 145615 Україна : МПК В09С 1/10 (2006.01); № и 2020 04453 ; заявл. 16.07.2020 ; опубл. 29.12.2020, Бюл. № 24.

65. Полутренко М., Грицуляк Г., Коцюбинський А., Сав'юк Р. Спосіб перероблення наземної частини сільфії пронизанолистої : патент на корисну модель. 143791 Україна: МПК (2020.01) D21С 3/00; № и 2020 01650 ; заявл. 10.03.2020 ; опубл. 10.08.2020 р. Бюл. № 15.

#### АНОТАЦІЯ

*Грицуляк Г. М.* Еколого-агрохімічна оцінка застосування осаду стічних вод як добрива за вирощування фітоенергетичних культур. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора сільськогосподарських наук за спеціальністю 03.00.16 – екологія – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, 2024.

Дисертаційну роботу присвячено дослідженню, яке зосереджується на екологічних засадах та підходах до застосування осаду стічних вод як добрива для вирощування фітоенергетичних культур. Проаналізовано важливі аспекти, такі як



якість осаду, небажані речовини, стандарти та норми, альтернативні методи обробки стічних вод, моніторинг впливу на навколишнє середовище та збереження біорізноманіття. Враховуючи ці фактори, дослідження спрямовано на розроблення ефективних та сталих практик використання осаду стічних вод для підвищення родючості ґрунту та підтримки вирощування енергетичних культур з метою зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

В дослідницькій роботі проаналізовано вплив застосовуваного осаду стічних вод на агроекологічний стан дерново-підзолистого ґрунту; розглянуто стратегії та технології ревіталізації нафтозабруднених ґрунтів; досліджено різноманітні методи очищення ґрунту від нафтових забруднень, включаючи біологічні, фізико-хімічні та фітотехнологічні підходи.

Вперше встановлено еколого-агрохімічну ефективність застосування осаду стічних вод, як добрива під фітоенергетичні культури, а також вирішено проблему екологічно безпечної їх утилізації на дерново-підзолистих ґрунтах Передкарпаття; на основі результатів комплексних ґрунтово-агрохімічних, мікробіологічних та агроекологічних досліджень визначено показники продуктивності агроценозів, економічної та енергетичної ефективності.

Удосконалено систему мінерального живлення фітоенергетичних культур з урахуванням впливу осаду стічних вод та компостів, виготовлених на його основі, на еколого-агрохімічний стан і фітотоксичність дерново-підзолистого ґрунту, характер трансформації в ньому органічної речовини, динаміку вмісту гумусових сполук та секвестрацію вуглецю, зміну фракційно-групового складу гумусу та біологічної активності ґрунту.

Набуло подальшого розвитку вчення про особливості екологічно безпечної утилізації місцевих сировинних ресурсів як джерела органічної речовини у ґрунті з метою відновлення його екологічних функцій.

Застосування ОСВ разом з мінеральними добривами значно підвищило продуктивність фітоенергетичних культур, таких як верба енергетична, сильфія пронизанолиста, світчграс, міскантус і топінамбур. Ефективність такого підходу відбивалося у збільшенні вегетативної маси на 57 – 64% порівняно з контрольними показниками.

Для верби енергетичної та сильфії пронизанолистої порядок підвищення концентрації елементів збільшувався у такому порядку: фосфор > калій > кальцій > нітроген; для світчграсу та міскантуса цей порядок змінювався так: фосфор > кальцій > калій > нітроген, а для топінамбура – фосфор > кальцій > нітроген > калій.

Найвищий вміст нітрогену у зеленій масі верби енергетичної спостерігається у випадку за внесення компосту на основі ОСВ і соломи у співвідношенні 3:1 та у дозуванні 60 т/га. Для топінамбура найвищі показники вмісту нітрогену, калію та кальцію досягалися при внесенні компосту на основі ОСВ у дозуванні 40 т/га із додаванням  $N_{10}P_{14}K_{58}$ .

Це дослідження підтверджує важливість інтегрованого підходу до внесення добрив, який включає використання як органічних, так і мінеральних компонентів для оптимізації живлення рослин і, як наслідок, підвищення їхньої продуктивності.

Окрім екологічної дослідження присвячено аналізу економічної та енергетичної ефективності використання осаду стічних вод як добрива для вирощування фітоенергетичних культур на дерново-підзолистих ґрунтах регіону

Передкарпаття. Робота вивчає потенціал використання цього інноваційного підходу до сільськогосподарського виробництва в контексті забезпечення відновлювальної енергії та сталого використання ресурсів.

На забруднених нафтою територіях Передкарпаття, після застосування різних доз органічних добрив (ОСВ) спостерігається зростання вмісту свинцю в рослинній масі міскантуса, який при дозі ОСВ 40 т/га та  $N_{10}P_{14}K_{58}$ , досягає 4,30 мг/кг ґрунту. Також ця доза добрив призводить до збільшення концентрації свинцю у біомасі світчграсу до 3,97 мг/кг ґрунту.

Коефіцієнти концентрації міцнозв'язаних форм кадмію коливаються у межах від 1,09 до 1,56. При цьому найвищі їх значення спостерігаються при додаванні органічних добрив (ОСВ) у кількості 40 ОСВ 40 т/га та  $N_{10}P_{14}K_{58}$ . Коефіцієнти концентрації міцнозв'язаних форм свинцю при культивуванні світчграсу з дозами 20 до 40 т/га (варіанти 4 – 6) встановлено у межах від 1,02 до 1,15. Змінність коефіцієнтів концентрації кадмію залишається у діапазоні від 1,18 до 1,49. Співвідношення між вмістом кадмію та свинцю у зеленій масі та концентрацією цих металів у коренях світчграсу і міскантуса, а також у вивченому ґрунті демонструє тісний кореляційний зв'язок із множинним коефіцієнтом детермінації  $R^2$  в межах 0,71 – 0,79.

Дослідження кореляційних залежностей між вмістом важких металів у ґрунті та їх накопиченням у рослинах вказує на можливість використання світчграсу та міскантуса як індикаторів забруднення довкілля нафтопродуктами. Порівняння коефіцієнтів біологічного поглинання плюмбуму показує, що для міскантуса вони менші на 0,5 порівняно із світчграсом, але коефіцієнти біологічного накопичення плюмбуму в міскантусі вищі на 0,14. Втім, коефіцієнт біологічного поглинання кадмію виявляється вищим для світчграсу, становлячи 336,67, тоді як для міскантуса він складає 288,33 (варіант 7) за внесення компосту на основі ОСВ та соломи (3:1) у дозі 20 т/га і  $N_{50}P_{16}K_{67}$ .

Відповідно до класифікації важких металів за величиною ГДК хімічних речовин у ґрунті, кадмій та плюмбум віднесені до I класу небезпеки, який ці метали становлять для екології, оскільки вони проявляють високу здатність до біологічного поглинання та є елементами активного накопичення. Ця особливість фітоенергетичних культур, таких як світчграс та міскантус, є важливою для підтримки екологічної стійкості ґрунтового покриву, що робить їх ефективними засобами для рекультивації та відновлення нафтозабруднених територій.

Оцінка енергетичної ефективності вирощування фітоенергетичних культур свідчать про найвищий економічний ефект при використанні компостів на основі органічних відходів та мінеральних добрив  $N_{10}P_{14}K_{58}$  у дозі 40 т/га. Вихід валової енергії з одиниці площі при вирощуванні енергетичної верби є досить великим при повторному внесенні свіжого органічного матеріалу, однак, з огляду на екологічну небезпеку збільшення вмісту важких металів у ґрунті понад гранично допустимі концентрації, доцільніше застосовувати компости на основі органічних відходів та соломи (у співвідношенні 3 : 1) у дозі 20–40 т/га. Вихід валової енергії з одиниці площі у разі вирощування сільфії, міскантуса та світчграсу є найвищим при внесенні свіжого органічного матеріалу в нормі 40 т/га та компостів на його основі з соломою (в пропорції 3:1) у дозі 30 т/га. З точки зору енергетичної ефективності вирощування фітоенергетичних культур, внесення органічного матеріалу у дозі 40 т/га, а також

компосту на основі органічних відходів і соломи (в пропорції 3:1) у дозі 30 т/га, забезпечує найкращі показники, зокрема коефіцієнти енергетичної ефективності на рівні 2,5 – 2,7 для топінамбура, 2,8 – 2,9 для енергетичної верби у другому циклі використання, а також інших енергетичних культур.

Для поліпшення фізико-хімічних властивостей дерново-підзолистого ґрунту рекомендується використовувати органічне добриво у дозі 60 т/га та компости на основі органічних відходів та тирси (у співвідношенні 3:1) також у дозі 60 т/га.

Для відновлення нафтозабруднених ґрунтів рекомендовано використовувати органічне добриво у нормі 40 т/га та комплексне мінеральне добриво з вмістом  $N_{10}P_{14}K_{58}$ . Це сприятиме підвищенню основних агрохімічних показників, зменшенню фітотоксичного впливу, а також зменшенню забруднення ґрунтів поллютантами. Рекомендовано вирощувати фітоенергетичні культури, такі як верба енергетична та міскантус. Для збільшення продуктивності енергетичних культур на 30 – 40% рекомендується вносити компости на основі органічних відходів та соломи (у співвідношенні 3:1) у дозі 30 т/га, а також додавати мінеральне добриво з вмістом  $N_{30}K_{55}$ . Також доцільно вносити свіже органічне добриво у дозі 40 т/га для світчграсу, міскантуса, сільфії пронизанолистої та топінамбура.

Для збільшення обсягу біомаси енергетичної верби на 60% порівняно з вирощуванням без добрив рекомендовано вносити свіже органічне добриво (ОСВ) та компости на основі соломи та тирси (у співвідношенні 3 : 1) у нормі 60 т/га.

**Ключові слова:** осад стічних вод, компости, фітоенергетичні культури, дерново-підзолистий ґрунт, екологічний стан ґрунту, ревіталізація, важкі метали, нафтозабруднений ґрунт.

## SUMMARY

Hrytsulyak H. M. Ecological and agrochemical assessment of the use of sewage sludge as a fertiliser for the cultivation of phytoenergy crops. – Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Agricultural Sciences in the speciality 03.00.16 – Ecology – Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, 2024.

The dissertation work is devoted to research that focusses on environmental principles and approaches to the use of sewage sludge as a fertiliser for growing energy crops. Important aspects such as sludge quality, undesirable substances, standards and norms, alternative methods of wastewater treatment, environmental impact monitoring and biodiversity conservation have been analysed. Taking into account these factors, the study is aimed at developing effective and sustainable practises for the use of sewage sludge to increase soil fertility and support the cultivation of energy crops, in order to reduce the negative impact on the environment.

The research work analysed the effect of the use of sewage sludge on the agroecological state of sod-podzolic soil; strategies and technologies for the revitalisation of oil-contaminated soils were considered; various methods of soil cleaning from oil pollution, including biological, physicochemical and phytotechnological approaches, were studied.

For the first time, the ecological and agrochemical efficiency of the use of sewage sludge as a fertiliser for energy crops was established, and the problem of environmentally safe utilisation on sod-podzoly soils of Precarpathia was resolved on the basis of the results

of complex soil-agrochemical, microbiological and agroecological studies, indicators of productivity of agrocenoses, economic and energy efficiency were determined;

The system of mineral nutrition of phytoenergy crops has been improved, taking into account the effect of sewage sludge and composts made on its basis on the ecological and agrochemical state and phytotoxicity of sod-podzolic soil, the nature of transformation of organic matter in it, the dynamics of the content of humus compounds and carbon sequestration, change in fractional and group composition of humus and biological activity of the soil;

The doctrine of the features of ecologically safe utilisation of local raw materials as a source of organic matter in the soil in order to restore its environmental functions has been further developed.

The use of sewage sludge together with mineral fertilisers has significantly increased the productivity of energy crops such as *Salix Viminalis L.*, *Miscanthus X giganteus*, *Silphium perfoliatum L.*, *Panicum Virgatum L.*, *Helianthus tuberosus L.*

The effectiveness of this approach was expressed in an increase in vegetative mass by 57 – 64% compared to benchmarks. For energy willow and cup-plant, the order of increasing the concentration of elements changed phosphorus > potassium > calcium > nitrogen. For switchgrass and silvergrass, this order changes to phosphorus > calcium > potassium > nitrogen, and for Jerusalem artichoke to phosphorus > calcium > nitrogen > potassium.

The highest nitrogen content in the green mass of energy willow is observed for the introduction of compost based on sewage sludge and straw in a ratio of 3:1 at a dose of 60 t/ha. For artichoke, the highest levels of nitrogen, potassium and calcium were achieved when compost based on sewage sludge was applied at a dose of 40 t/ha with the addition of  $N_{10}P_{14}K_{58}$ .

This study highlights the importance of an integrated approach to fertilisation, which includes the use of both organic and mineral components to optimise plant nutrition and, as a result, increase their productivity.

The study is devoted to the analysis of the economic and energy efficiency of the use of sewage sludge as a fertiliser for the cultivation of energy crops on sod-podzolic soils of the Precarpathian region. The work is exploring the potential of using this innovative approach to agricultural production in the context of providing renewable energy and sustainable use of resources.

In the oil-contaminated areas of Precarpathia, after the use of various doses of organic fertilisers (sewage sludge), there is an increase in the lead content in the plant mass of miscanthus at a dose of sewage sludge 40 t/ha and  $N_{10}P_{14}K_{58}$ , reaching 4.30 mg/kg of soil. Also, this dose of fertilisers leads to an increase in the concentration of lead in the biomass of switchgrass to 3.97 mg/kg of soil.

The concentration coefficients of gross forms of cadmium range from 1.09 to 1.56, with the highest values observed when adding organic fertilisers (sewage sludge) in the amount of 40 sewage sludge 40 t/ha and  $N_{10}P_{14}K_{58}$ . The concentration coefficients of gross lead forms in the cultivation of switchgrass with doses of 20 to 40 t/ha (variants 4 – 6) have indicators from 1.02 to 1.15. The variability of cadmium concentration coefficients remains in the range from 1.18 to 1.49. The relationship between the content of cadmium and lead in the green mass and the concentration of these metals in the roots of switchgrass and cup-plant, as well as in the studied soil, shows a close correlation, with a multiple determination

coefficient of  $R^2$  in the range of 0.71 – 0.79.

The study of correlation dependencies between the content of heavy metals in the soil and their accumulation in plants indicates the possibility of using switchgrass and cup-plant as indicators of environmental pollution by petroleum products. Comparison of the coefficients of biological absorption of the plumbum shows that for cup-plant they are 0.5 less compared to the svizhgras, but the coefficients of biological accumulation of the plumbum in cup-plant are higher by 0.14. However, the coefficient of biological absorption of cadmium turns out to be higher for switchgrass, being 336.67, while for miscanthus it is 288.33 (variant 7) for applying compost based on SS and straw (3:1) at a dose of 20 t/ha and  $N_{50}P_{16}K_{67}$

According to the classification of heavy metals by the value of the MPC of chemicals in the soil, cadmium and lead are assigned to the first class of danger, which these metals pose to the environment, because they show a high capacity for biological absorption and are elements of active accumulation. This feature of energy crops, such as swichgrass and cup-plant, is important to maintain the environmental sustainability of the soil cover, making them effective means for reclamation and restoration of oil-contaminated areas.

Economic calculations and assessment of the energy efficiency of growing phytoenergy crops indicate the most favourable economic result when using composts based on organic waste and mineral fertilisers  $N_{10}P_{14}K_{58}$  in the norm of 40 t/ha. The output of gross energy from a unit area in the cultivation of energy willow is quite large when fresh organic material is re-injected, but given the environmental danger of increasing the content of heavy metals in the soil above the maximum permissible concentrations, it is more expedient to use composts based on organic waste and straw (in a ratio of 3:1) at a dose of 20–40 t/ha. The output of gross energy from a unit of area during the cultivation of silvergrass, cup-plant and switchgrass is the highest when introducing fresh organic material at a norm of 40 t/ha and composts based on it with straw (in a ratio of 3:1) in the norm of 30 t/ha. In terms of energy efficiency of growing phytoenergy crops, the introduction of organic material in the norm of 40 tons per hectare, as well as compost based on organic waste and straw (in a ratio of 3:1) in the norm of 30 t/ha, provides the best indicators, in particular energy efficiency coefficients at the level of 2.5–2.7 for Jerusalem artichoke, 2.8 – 2.9 for energy willow in the second cycle of use, as well as other energy crops. To improve the physicochemical properties of sod-podzolic soil, it is recommended to use organic fertiliser in the norm of 60 t/ha and compost based on organic waste and sawdust (in a ratio of 3:1) also in the norm of 60 tons per hectare.

To restore oil-contaminated soils, it is recommended to use organic fertiliser at the rate of 40 t/ha and complex mineral fertiliser with the content of  $N_{10}P_{14}K_{58}$ . This will lead to an increase in the main agrochemical indicators, a decrease in phytotoxic exposure, as well as a decrease in soil pollution by pollutants. It is recommended to grow energy crops such as energy willow and cup-plant. To increase the productivity of energy crops by 30 – 40%, it is recommended to apply composts based on organic waste and straw (in a ratio of 3:1) in the norm of 30 t/ha, as well as add mineral fertiliser with the content of  $N_{30}K_{55}$ . It is also advisable to apply fresh organic fertiliser at a rate of 40 t/ha for switchgrass, cup-plant, silvergrass and Jerusalem artichoke. To increase the biomass of energy willow by 60% compared to control, it is recommended to apply fresh organic fertiliser (SS) and composts based on straw and sawdust (in a ratio of 3:1) in a norm of 60 t/ha.

**Keywords:** sewage sludge, composts, phytoenergy crops, sod-podzolic soil,

ecological condition of the soil, revitalization, heavy metals, oil-contaminated soil.