

УДК 574.64 : 631.95 : 633.34

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.144.9>

ІНТЕНСИВНІСТЬ НАКОПИЧЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ НАСІННЯМ РОСЛИН СОЇ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЇХ ЗРОСТАННЯ В АГРОЕКОСИСТЕМІ НА ПЕВНІЙ ВІДСТАНІ ВІД ЛІСУ

Врадій О.І. – к.с.-г.н.,

доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища,

Вінницький національний аграрний університет

orcid.org/0000-0001-7383-3829**Алексеев О.О.** – к.с.-г.н.,

доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища,

Вінницький національний аграрний університет

orcid.org/0000-0001-5807-4932**Матусяк М.В.** – к.с.-г.н.,

доцент кафедри лісового та садово-паркового господарства,

Вінницький національний аграрний університет

orcid.org/0000-0001-8099-7290**Салямон А.В.** – аспірант кафедри екології

та охорони навколишнього середовища,

Вінницький національний аграрний університет

orcid.org/0009-0006-9236-7652

Сучасні агроєкосистеми зазнають значного впливу техногенних, військових та агрохімічних чинників, які призводять до накопичення важких металів у ґрунтах та сільськогосподарській продукції. Однією з критично важливих культур для аграрного сектору України є соя – джерело білка, олії, кормової сировини та компонент харчових продуктів і біопалива. Ураховуючи високий рівень поглинання токсичних речовин соєю, виникає потреба у дослідженні екотоксикологічного стану насіння в залежності від просторового фактору – відстані від лісових масивів, які можуть виступати природними буферами.

У статті висвітлено результати дослідження впливу просторового розташування посівів сої відносно лісових насаджень екотоксикологічний стан зразків, зокрема за вмістом важких металів. Дослідження проводилось в умовах агроєкосистеми Лісостепу Правобережного. Вивчено концентрації свинцю (Pb), кадмію (Cd), цинку (Zn) та міді (Cu) у насінні сої сорту Аполло залежно від відстані (10–1000 м) від лісу. Зразки зерна досліджувались методом атомно-абсорбційної спектроскопії.

Результати показали, що на ближчих до лісу ділянках рівень накопичення токсичних елементів був значно нижчим, ніж на віддалених територіях. Зокрема, концентрація свинцю у зразках, відібраних на 1000 м від лісу, перевищувала гранично допустимі значення у 8,9 раза, тоді як на відстані 50 м – лише в 3 рази. Вміст міді у всіх зонах перевищував ГДК (до 1,87 рази). Показники кадмію залишилися в межах допустимих концентрацій, проте виявлено зростання його рівня на 200 м від лісу. Перевищення вмісту цинку виявлено у трьох з шести зразках, що свідчить про можливе агрохімічне навантаження.

Розраховано коефіцієнти небезпеки для кожного металу та інтегральний індекс НІ, який сягав максимуму на 1000 м (12,48) та був удвічі меншим на 50 м (5,72), що підтверджує захисну роль лісових масивів у стримуванні забруднення агропродукції. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації просторової організації агроландшафтів, управління ризиками в агровиробництві, експортної сертифікації продукції (особливо органічної та поп-GMO) та зменшення токсикологічного навантаження на кінцевого споживача.

Ключові слова: соя, зерно, якість, важкі метали, агроєкосистема, ліс, екотоксикологія.

Vradii O.I., Alieksieiev O.O., Matusiak M.V., Saliamon A.V. The intensity of heavy metal accumulation by soybean seeds depending on their growth in the agroecosystem at a certain distance from the forest

Modern agroecosystems are significantly affected by technogenic, military and agrochemical factors, which lead to the accumulation of heavy metals in soils and agricultural products. One of the critically important crops for the agricultural sector of Ukraine is soybean – a source of protein, oil, feed raw materials and a component of food products and biofuels. Given the high level of absorption of toxic substances by soybean, there is a need to study the ecotoxicological state of seeds depending on the spatial factor – distance from forest areas, which can act as natural buffers.

The article highlights the results of a study of the influence of the spatial arrangement of soybean crops relative to forest stands on the ecotoxicological state of samples, in particular, the content of heavy metals. The study was conducted in the conditions of the agroecosystem of the Right Bank Forest-Steppe. The concentrations of lead (Pb), cadmium (Cd), zinc (Zn) and copper (Cu) in the seeds of the Apollo variety of soybean were studied depending on the distance (10–1000 m) from the forest. The grain samples were studied by atomic absorption spectroscopy. The results showed that in areas closer to the forest, the level of accumulation of toxic elements was significantly lower than in remote areas. In particular, the concentration of lead in samples taken 1000 m from the forest exceeded the maximum permissible values by 8.9 times, while at a distance of 50 m – only 3 times. The content of copper in all zones exceeded the MPC (up to 1.87 times). Cadmium levels remained within permissible concentrations, but an increase in its level was detected 200 m from the forest. Excess zinc content was detected in three out of six samples, indicating a possible agrochemical load.

Hazard coefficients were calculated for each metal and the integral index HI, which reached a maximum at 1000 m (12.48) and was half as high at 50 m (5.72), confirming the protective role of forests in containing agricultural pollution. The results obtained can be used to optimize the spatial organization of agricultural landscapes, manage risks in agricultural production, export certification of products (especially organic and non-GMO) and reduce the toxicological load on the end consumer.

Key words: soybean, grain, quality, heavy metals, agroecosystem, forest, ecotoxicology.

Постановка проблеми. Соя є надзвичайно важливою культурою в Україні завдяки поєднанню високої економічної вигоди, агротехнічної користі для ґрунтів і значення для екологічно сталого сільського господарства. Її потенціал в умовах змін клімату та сучасних викликів лише зростає [6].

Соя – одна з найцінніших олійних і білкових культур у світі. Вона має високий вміст білка (до 40%) та олії (до 20%), що робить її ключовою культурою для: тваринництва (шрот, жом); харчової промисловості (соеве молоко, м'ясо, масло); біоенергетики (соева олія як сировина для біодизелю) [8].

Україна входить до ТОП-10 світових експортерів сої. Найвищі врожаї – у Центральному, Північному та Східному Лісостепу, а також на півдні Західної України. Експорт сої і соєвого шроту – важливе джерело валютних надходжень [4].

Вирощування сої має стратегічне значення для аграрного сектору України з огляду на її економічну, екологічну та агротехнічну цінність. Економічне значення, полягає у тому, що Україна входить до топ-10 світових експортерів сої. Основні імпортери – ЄС, Туреччина, Китай [10].

Соя є прибутковою культурою завдяки високому попиту на зерно, шрот і олію. Соевий шрот широко використовується як високобілковий корм. Агротехнічні переваги полягають у тому, що соя здатна фіксувати атмосферний азот через симбіоз із бульбочковими бактеріями, що покращує родючість ґрунту. У сівозміні соя залишає після себе ґрунт, збагачений органічними речовинами й азотом. Посухостійкість нових сортів дозволяє вирощувати сою в різних кліматичних зонах, включаючи південь України [2].

Екологічна важливість сої полягає в тому, що знижуються потреби в азотних добривах завдяки природній фіксації азоту. Соя пригнічує бур'яни й не потребує

великої кількості ЗЗР у порівнянні з іншими культурами. Підвищення стійкості агроєкосистем до кліматичних змін завдяки гнучкості вирощування також є перевагою вирощування сої. Соя – важливе джерело рослинного білка, що може замінювати тваринні білки у харчовій промисловості [3].

В умовах війни та зміни логістичних маршрутів вирощування сої всередині країни зменшує залежність від імпорту кормів. Так, в умовах війни та обмеженого доступу до добрив соя стає економічно вигіднішою за інші олійні культури (ріпак, соняшник). Попит на без-ГМО сою в ЄС дає Україні експортні переваги (багато виробників мають відповідні сертифікати) [5]. Проблема глобального потепління стимулює перехід до ресурсощадних культур, а соя – одна з них. Площа посівів сої за 2024 рік склала приблизно 1,4 млн га, урожайність – 2,5–3,1 т/га (у гарних господарствах). Основні області вирощування сої – Вінницька, Черкаська, Полтавська, Хмельницька, Житомирська, частка експорту > 60% від виробленого обсягу, а попит на світовому ринку – стійке зростання (особливо в ЄС і Азії). Вирощування сої в Україні – це не лише аграрна доцільність, а й стратегічна перевага, яка відповідає викликам сучасного ринку, зміни клімату та економічної нестабільності. В умовах воєнного та післявоєнного відновлення соя залишається ключовою культурою сталого землеробства та експорту [7].

Проблема забруднення агроєкосистем важкими металами зростає в умовах інтенсифікації сільського господарства, військових дій та техногенного навантаження в Україні і спостерігається збільшення вмісту свинцю (Pb), кадмію (Cd), цинку (Zn), міді (Cu) в ґрунтах та можливість їх міграції із ґрунту до зерна сільськогосподарських рослин, в тому числі і сої, що є прямою загрозою для здоров'я людини та тварин. Соя – культура з високою здатністю до акумуляції. Соеві рослини мають розвинену кореневу систему, здатну поглинати важкі метали [9]. Важкі метали можуть накопичуватися в насінні, яке використовується: у харчовій промисловості (соеві продукти, борошно, молоко), у тваринництві (соевий шрот для корму), у біоенергетиці (олія для біопалива). Накопичення токсичних металів у насінні порушує продовольчу безпеку і може призвести до токсичних уражень при тривалому споживанні [11].

До джерел забруднення важкими металами елементів екосистем та агроєкосистем відносять: викиди промислових підприємств, використання пестицидів і мінеральних добрив, забруднені зрошувальні води та ґрунти поблизу автошляхів або промзон. У дослідженнях з регіонів поблизу промзон виявляли перевищення Cd у сої до 0,2–0,3 мг/кг (при нормі $\leq 0,1$ мг/кг згідно з ДСТУ/ЄС). Свинець перевищував норму в зерні, вирощеному ближче ніж 100 м до автошляхів або металургійних комбінатів. Наслідками вживання забрудненого зерна для організму людини можуть бути накопичення в кістках, печінці, нирках свинцю [4]. Свинець токсичний для нервової системи, викликає когнітивні розлади, анемію, порушення розвитку в дітей, має кумулятивний ефект – виводиться повільно. Кадмій токсичний для нирок, викликає остеомаліцію (розм'якшення кісток), є канцерогеном (IARC група 1), впливає на репродуктивну систему. Мідь і цинк у малих дозах – незамінні мікроелементи, але при надлишку – порушують метаболізм, викликають нудоту, блювання, ураження печінки [12].

Отже, соя, вирощена на забруднених територіях, може накопичувати небезпечні концентрації важких металів. Регулярне вживання такого зерна загрожує порушеннями здоров'я, особливо нирок, печінки, нервової системи. Моніторинг екоотоксикологічного стану сої є критично важливим для продовольчої безпеки, особливо в умовах індустріального чи військового навантаження на агроєкосистеми [13].

Екотоксикологічний аналіз – ключ до безпечної агропродукції. Відповідно до Гігієнічного нормативу ДСанПіН 8.8.1.2.3.4-000-2001, встановлені гранично допустимі концентрації важких металів у продуктах харчування: Pb – до 0,2 мг/кг; Cd – до 0,05 мг/кг; Cu – до 10 мг/кг; Zn – до 50 мг/кг. Дослідження допомагає: виявити небезпечні ділянки вирощування; зпрогнозувати вплив забруднення на врожай і його безпечність; рекомендувати фіторе mediaційні, агротехнічні або хімічні заходи зменшення токсичності. Контекст воєнного часу посилює актуальність цього дослідження. Внаслідок обстрілів, згорілої техніки, використання вибухових речовин на полях уражаються ґрунти і водойми; накопичуються токсичні речовини в агрокультурах, включно з соєю; зерно сої може стати об'єктом експортного контролю. Європейські споживачі, які закупають українську сою, вимагають сертифікати якості і підтвердження відсутності токсичних речовин [3]. Дослідження забезпечує конкурентоздатність продукції на зовнішніх ринках (особливо non-GMO та organic segment). Дослідження екотоксикологічного стану зерна сої на вміст важких металів є науково обґрунтованою та стратегічно важливою темою, що поєднує проблематику екології, агрономії, безпеки харчових продуктів та сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Міжнародні дослідження (Південний Хунань, Китай) показують, що дослідники виявили значне забруднення Pb (геоіндекс >3) і Cd (>5) у ґрунтах поблизу гірничо-збагачувальних підприємств. Насіння сої містило в середньому 13,9 мг/кг Pb та 2,95 мг/кг Cd Huang et al. [13]. Коріння добре накопичує Cd, а стебла ефективно транспортують Pb, Cd і Zn у вегетативну масу і зерно [16]. Біодоступні форми металів у ґрунті (обмінні) корелюють з їхнім вмістом у сої. Загальний узагальнювальний огляд (MDPI) показує, що за ступенем накопичення металів у сої: Zn > Cd > Cu > Pb розташовується у такій послідовності MDPI-огляд 2022 [15]. Тобто цинк і кадмій поглинаються найінтенсивніше, свинець менш мобільний.

Дослідження українських вчених у зоні Полісся та Лісостепу показують загальні закономірності накопичення важких металів зерном сої: Cd, Pb, Cu, Zn мігрують у систему «ґрунт–рослина» з вираженим вертикальним профілюванням Козьякова Н.О. [16].

Наприклад, Vradii O., Saliamon A. [3, 11. 12] стверджують, що у природних фітоценозах неагарних земель зафіксовано Pb 2,9–3,2 мг/кг, Cd 0,48–0,51 мг/кг, Zn 11–18 мг/кг. Метали накопичуються навіть без перевищення ГДК у ґрунті. Механізми міграції важких металів для багатьох рослин залишаються релевантними для агроєкосистем поряд із лісом.

Мета дослідження – встановити залежність між інтенсивністю накопичення важких металів (Pb, Cd, Cu, Zn) у насінні сої та просторовим розташуванням рослин у межах агроєкосистеми, зокрема відстанню до лісової межі в умовах Лісостепу правобережного. Дослідження спрямоване на: визначення рівня забруднення насіння важкими металами; оцінку впливу буферної функції лісових насаджень; виявлення просторових закономірностей у накопиченні токсикантів.

Матеріали та методи досліджень. Насіння сої для досліджень відбирали на площі агроєкосистеми, що включає в свій склад широколистяний ліс експлуатаційного призначення з переважаючими дубовими та дубово-грабовими насадженнями з переважанням твердолистяних порід, зокрема дуба та граба, що розташовані у південно-західній експозиції схилів, де більше тепла, що і зумовлює зростання даних порід дерев з висотою дерев 16-25 метрів та агроценоз, що включає в себе поле площею 33 га, на якому основною культурою, яку вирощують є соя сорту Аполло,

Seed Graine Company, Канада. Попередником була озима пшениця сорту Кубус, що розташовані в селі Плебанівка Жмеринського району Шаргородської міської громади Вінницького району (48°47'39" пн. ш. 28°00'36" сх. д.). Перед посівом основної культури (сої) було проведено дискове лушення попередника озимої пшениці дисковою бороною АГ-2.4. В 1 декаді листопада проведено оранку на глибину 18-20 см. При настанні фізичної спілості ґрунту проведено закриття вологи. Норма висіву сої 140 кг/га з одночасним внесенням мінеральних добрив сульфат амонію у нормі 100 кг/га. Збір насіння сої відбувався у жовтні місяці 2024 року.

Визначення важких металів у насінні сої проводилося за допомогою методу атомно-абсорбційної спектроскопії, який полягає у визначенні наявності та концентрації різних хімічних елементів шляхом поглинання атомами цих елементів квантів світла певних довжин хвиль у Південно-західному міжрегіональному центрі ДУ «Держґрунтохорона». Розбивка ділянки на зони за відстанню від лісу: 10, 50, 100, 200, 500 та 1000 м. У кожній зоні відбирається по 5 зразків рослин сої (насіння).

Виклад основного матеріалу досліджень. За результатами досліджень (табл. 1) у насінні сої, вирощеному на різній відстані від лісу встановлено, що у всіх зразках спостерігається перевищення у 3,5–9 разів. Найменша концентрація: 0,61 мг/кг (50 м), а найвища: 1,78 мг/кг (1000 м). Свинець накопичується інтенсивніше з віддаленням від лісу. Ліс, ймовірно, діє як буфер і затримує частину Pb з повітря або ґрунтової міграції.

Таблиця 1

Концентрація важких металів у насінні сої, мг/кг

№ з/п зразка	Важкі метали							
	Свинець (Pb)	ГДК	Кадмій (Cd)	ГДК	Цинк (Zn)	ГДК	Мідь (Cu)	ГДК
1 (10 м)	0,71	0,2	0,014	0,05	35,25	50,0	16,35	10,0
2 (50 м)	0,61	0,2	0,017	0,05	36,15	50,0	16,10	10,0
3 (100 м)	0,68	0,2	0,010	0,05	47,15	50,0	15,15	10,0
4 (200 м)	0,74	0,2	0,032	0,05	55,10	50,0	16,63	10,0
5 (500 м)	1,71	0,2	0,015	0,05	52,31	50,0	16,03	10,0
6 (1000 м)	1,78	0,2	0,020	0,05	65,35	50,0	18,72	10,0

У жодному зразку не зафіксовано перевищення ГДК по кадмію. Значення варіюють від 0,010 до 0,032 мг/кг. Найвища концентрація: зразок 4 (200 м) – 0,032 мг/кг. Вміст Cd у межах норми, ризик низький, але варто продовжити моніторинг, особливо в зонах, близьких до техногенних джерел.

По цинку присутнє перевищення ГДК у 3-х зразках: №4 (55,10 мг/кг), №5 (52,31 мг/кг), №6 (65,35 мг/кг). Найвища концентрація – 65,35 мг/кг (1000 м), що на 30% вище за норму. У віддалених ділянках спостерігається накопичення Zn, можливо, через розораність, менший буферний вплив лісу або особливості ґрунту. По міді усі зразки перевищують норму, іноді майже вдвічі. Найвищий показник: 18,72 мг/кг (1000 м).

Нами розрахований коефіцієнт небезпеки важких металів у зерні сої (табл. 2), що демонструє оцінку ступеня небезпечності елемента-забруднювача. За нормальних умов коефіцієнт небезпеки має бути меншим або рівним 1. Визначається за формулою:

$$K_{нб} = \frac{Ci}{ГДК_i} \geq 1 \quad (1)$$

де C_i – концентрація i -тої забруднюючої речовини, мг/кг; ГДК $_i$ – гранично допустима концентрація i -тої забруднюючої речовини, мг/кг.

Таблиця 2

Коефіцієнт небезпеки важких металів

Відстань від лісу	Pb (свинець)	Cd (кадмій)	Zn (цинк)	Cu (мідь)
10 м	3,55	0,28	0,70	1,64
50 м	3,05	0,34	0,72	1,61
100 м	3,40	0,20	0,94	1,52
200 м	3,70	0,64	1,10	1,66
500 м	8,55	0,30	1,05	1,60
1000 м	8,90	0,40	1,31	1,87

Свинець (Pb) у всіх зразках значення КН значно перевищує 1 (до 8,9 на 1000 м), що свідчить про високий токсикологічний ризик. Найнижче навантаження – біля лісу (3,05–3,55), найвища небезпека – на 500–1000 м.

Кадмій (Cd) – усі показники менші за 1, отже, гострої небезпеки немає, але максимальне значення на 200 м (0,64) свідчить про необхідність подальшого моніторингу.

По цинку (Zn) значення перевищують 1 на відстанях 200 м, 500 м, 1000 м (максимум 1,31), що вказує на ймовірний екотоксикологічний ризик у віддалених зонах.

Мідь (Cu) у всіх точках КН > 1, що свідчить про стабільне перевищення допустимого рівня. Найвищий показник – 1,87 на 1000 м.

Свинець та мідь – критичні елементи, що становлять реальну токсикологічну загрозу в усіх точках, особливо на віддалених ділянках від лісу.

На основі розрахунку інтегрального індексу небезпеки (ІІ) – суми коефіцієнтів небезпеки (КН) для чотирьох металів (Pb, Cd, Zn, Cu) – отримано значення відображені у табл. 3 та на рис. 1.

Таблиця 3

Інтегральний індекс небезпеки

Відстань від лісу	Pb	Cd	Zn	Cu	ІІ (сума КН)
10 м	3,55	0,28	0,70	1,64	6,17
50 м	3,05	0,34	0,72	1,61	5,72
100 м	3,40	0,20	0,94	1,52	6,06
200 м	3,70	0,64	1,10	1,66	7,10
500 м	8,55	0,30	1,05	1,60	11,50
1000 м	8,90	0,40	1,31	1,87	12,48

Найнижчий загальний ризик ($ІІ \leq 6,2$) – на відстанях 10–100 м від лісу. Тут діє буферна роль лісу, яка зменшує надходження токсикантів у зерно. Максимальний рівень токсикологічного ризику спостерігається на 500–1000 м – ІІ сягає 11,5–12,5, що майже вдвічі вище, ніж біля лісу.

Високі значення Pb та Cu є основними причинами зростання інтегрального ризику, що робить необхідним контроль цих металів у віддалених агроділянках.

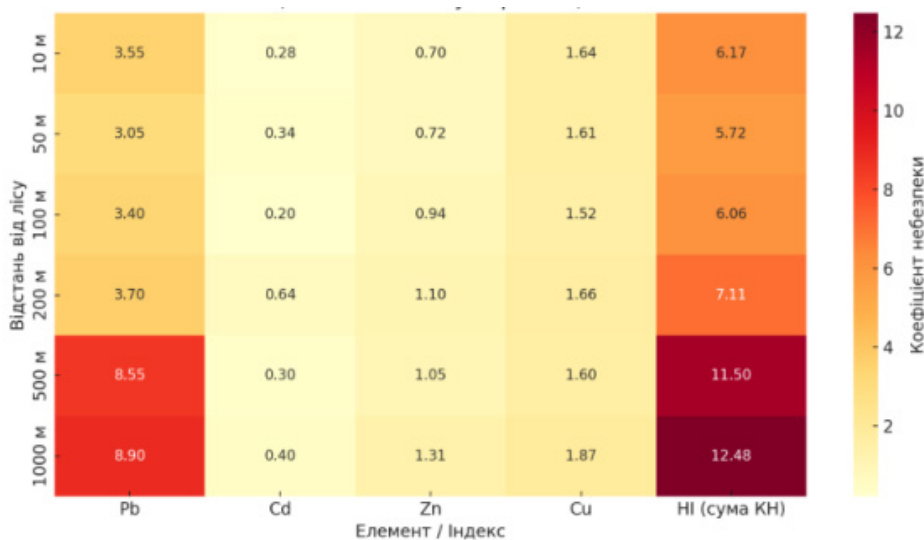


Рис. 1. Теплова карта коефіцієнта небезпеки та загального індексу HI (важкі метали у зерні сої)

Практичне значення HI: цей показник може бути використаний як критерій безпечності для сортування партій зерна сої, особливо при експорті або виробництві продуктів дитячого харчування.

Висновки і пропозиції. Систематичне перевищення свідчить про можливе агротехнічне або техногенне джерело накопичення (наприклад, використання фунгіцидів, мінеральних добрив з вмістом міді).

Свинець і мідь: стабільно перевищують ГДК на всіх відстанях – потребують негайного контролю. Цинк: перевищення в 3 з 6 точок, також потребує обмеження/відновлення. Кадмій: в межах норми, але моніторинг рекомендовано продовжити. Залежність: чим далі від лісу – тим вище концентрація металів, тобто ліс виконує буферну/захисну функцію.

Лісові насадження дійсно виконують буферну функцію, обмежуючи міграцію і накопичення Pb, Cu та Zn у зерні сої. Соя, вирощена далі ніж 200 м від лісу, потенційно небезпечна для харчового використання без попереднього очищення або сортування.

Як пропозицію при плануванні розміщення посівів сої в агроекосистемах варто враховувати розташування відносно лісу як важливий екологічний фільтр, що знижує токсичне навантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Pantsyрева H., Aliksieiev O., Tsyhanska O., Vradii O., Honchar M. Formation of qualitative indicators of chickpea seed production under climatic changes in the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES)*. 2025. Vol. 15 (2). P. 51–54. <https://doi.org/10.31407/ijeess15.207>
2. Vradii O., Mudrak H., Aliksieiev O. Application of biological preparations on the crops of perennial leguminous grasses as a means of providing soils with atmospheric nitrogen. In: *Ecology, Biotechnology, Agriculture and Forestry in the 21st*

century: problems and solutions. Monograph. Edited by S. Stankevych, O. Mandych. Estonia. Tallinn: Teadmus OÜ, 2024. P. 252–269.

3. Vradii O., Saliamon A. Influence of location of forests on agrochemical and toxicological indicators of soil fertility in agroecosystems. In: *Agroecology, agriculture, forestry and horticulture in the 21st century: problems and solutions*. Monograph. Edited by S. Stankevych, O. Mandych. Tallinn: Teadmus OÜ, 2025. P. 139–154.

4. Первачук М.В., Врадій О.І. Інтенсифікація процесу фіксації атмосферного азоту під впливом мікробних препаратів на посівах багаторічних бобових трав. *Сільське господарство та лісівництво*. 2016. № 4 (1). С. 220–230.

5. Врадій О.І. Застосування біологічних препаратів на посівах багаторічних бобових трав як засіб забезпечення ґрунтів атмосферним азотом. *Сільське господарство та лісівництво*. 2017. № 6. Т. 1. С. 149–158.

6. Врадій О.І. Біологічні препарати як чинник посилення мікробіологічної діяльності агрофітоценозу бобових культур. *Сільське господарство та лісівництво*. 2017. Вип. № 7. Т. 1. С. 220–230.

7. Мазур В.А., Врадій О.І. Моніторинг забруднення ґрунтів важкими металами науково-дослідної ділянки в НДГ «Агрономічне» Вінницького національного аграрного університету. *Сільське господарство та лісівництво*. 2019. № 2 (13). С. 16–24.

8. Ткачук О.П., Врадій О.І. Баланс поживних речовин у ґрунті при вирощуванні зернобобових культур. *Екологічні науки*. 2022. № 2 (41). С. 43–47. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.2-41.7>

9. Ткачук О.П., Врадій О.І. Параметри кореневих систем бобових багаторічних трав як чинник впливу на агроекологічний стан ґрунту. *Екологічні науки*. 2023. № 1 (46). С. 153–161. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.1-46.25>

10. Aliksieiev O.O., Vradii O.I. Organic agriculture as an element of soil preservation and restoration. *Сільське господарство та лісівництво*. 2023. № 3 (30). С. 228–239.

11. Врадій О.І., Салимон А.В. Вплив розташування лісів на агрохімічні показники родючості ґрунту в агроєкосистемі. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 9. С. 218–225. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.9.2024.22>

12. Врадій О.І., Салимон А.В. Екотоксикологічна оцінка ґрунтів агроєкосистеми Лісостепу Правобережного. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки*. 2024. Вип. 138. С. 397–403. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.138.47>

13. Врадій О.І., Алексєєв О.О., Салимон А.В. Біотичні показники росту і розвитку сої залежно від її розміщення в агроєкосистемі на певній відстані від лісу. *Вісник Сумського національного аграрного університету. (Агрономія і біологія)*. 2025. Вип. 1 (59). С. 51–56. <https://doi.org/10.32782/agrobio.2025.1.7>

14. Huang et al., 2013 (Hunan): аналіз geo-index і НАП у сої. URL: pubmed.ncbi.nlm.nih.gov (дата звернення: 20.11.2024 р.).

15. MDPI-огляд 2022: порівняння коефіцієнтів накопичення металів у сої. URL: mdpi.com (дата звернення: 17.12.2024 р.).

16. Козьякова Н.О., 2002: базові механізми переносу Cd, Pb, Cu, Zn у ґрунто-рослинній системі Полісся/Лісостепу. URL: journal-grain-crops.com (дата звернення: 7.02.2025 р.).