

ПІДВИЩЕННЯ БАР'ЄРНИХ ФУНКЦІЙ ҐРУНТУ ЗА НЕБЕЗПЕКИ ЗАБРУДНЕННЯ КАДМІЄМ З МЕТОЮ ОДЕРЖАННЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ КАПУСТИ БІЛОГОЛОВОЇ

В. Снітинський, д. б. н.

ORCID ID: 0000-0001-9633-1004

А. Дидів, к. с.-г. н.

ORCID ID: 0000-0002-4436-9008

Н. Качмар, к. с.-г. н.

ORCID ID: 0000-0003-4471-5895

М. Іванків, к. с.-г. н.

ORCID ID: 0000-0002-4911-2877

Т. Дацко, к. с.-г. н.

ORCID ID: 0000-0002-2957-1822

Львівський національний університет природокористування

<https://doi.org/10.31734/agronomy2022.26.014>

Снітинський В., Дидів А., Качмар Н., Іванків М., Дацко Т. Підвищення бар'єрних функцій ґрунту за небезпеки забруднення кадмієм з метою одержання екологічно безпечної продукції капусти білоголової

Ґрунт – специфічний компонент біогеосфери. Він здатен акумулювати забруднювачі та є їхнім природним буфером, проміжною або кінцевою ланкою транслокації хімічних елементів і різних сполук у циклі: атмосфера – гідросфера – жива речовина – літосфера. Близько 90 % важких металів (ВМ), що потрапили у довкілля, акумулюються ґрунтами, забруднюючи суміжні середовища та біоту, або зазнають седиментації (фіксації у твердій фазі). Надходження таких важких металів як Cd, Pb, Zn, Ni, Hg в агроєкосистеми значно переважає їх природний винос та включення в біогеохімічний кругообіг. Усі основні цикли природної міграції важких металів у біогеосфері (водні, атмосферні, біотичні) починаються з літосфери. Антропогенне забруднення ґрунтів доповнює ці цикли, і якщо ґрунти не «справляються» з їх седиментацією, або слабо «працюють» як буфери, потрібні додаткові агротехнічні заходи з метою запобігання забрудненню агропродукції важкими металами. Саме тут відбуваються їх мобілізація і утворення різних міграційних форм та токсичних фонів. Більшість важких металів, які потрапили на поверхню ґрунту, затримуються органічними компонентами (закріплюються у верхніх гумусових горизонтах) або фіксуються його мінеральною складовою і зазнають седиментації.

Для підвищення бар'єрних функцій ґрунту, забрудненого важкими металами, з метою одержання екологічно безпечної агропродукції вносять органічні та бактеріальні добрива, використовують сидерати, правильно чергують культури у сівозміні, раціонально застосовують комплексні мінеральні добрива та кальцієві меліоранти, що допомагають підтримувати сприятливі фізико-хімічні властивості ґрунту та підвищувати його родючість. Ці та інші заходи збільшують буферність та седиментаційний потенціал ґрунтів стосовно рухомих форм важких металів та інших ксенобіотиків.

Дослідженнями встановлено, що застосування органічної та органо-мінеральної систем удобрення у поєднанні з вапнуванням ґрунту у нормі Біогумус 8 т/га + CaCO₃ 5 т/га та N₆₄P₆₄K₆₄+ Біогумус 4 т/га + CaCO₃ 5 т/га сприяло активізації бар'єрних функцій ґрунту, а відтак – зниженню рухомості йонів Cd²⁺ у ґрунті та зменшенню їх транслокації в рослини капусти білоголової на всіх рівнях змодельованого забруднення ґрунту кадмієм.

З'ясовано, що на контрольному фоні у зазначених варіантах досліду були: найменша концентрація рухомих форм кадмію у ґрунті – 0,051 та 0,063 мг/кг, найнижчий перехід елемента з валової форми у рухому 3,30 та 4,67 % за коефіцієнта небезпеки 0,07 та 0,09. Відповідно у цих варіантах коефіцієнти небезпеки концентрації елемента в головках капусти також були найменшими (0,13 та 0,21), що свідчить про екобезпечність продукції капусти білоголової та доцільність застосування методів хімічної меліорації ґрунтів, забруднених важкими металами. Виявлено сильний кореляційний зв'язок ($r = 0,96$) між концентрацією рухомих форм Cd²⁺ у ґрунті та концентрацією елемента в рослинах капусти білоголової.

Ключові слова: забруднення, седиментація, буферність ґрунту, капуста білоголова, важкі метали, рухомість, транслокація йонів, меліоранти, добрива.

Snitynskyi V., Dydiv A., Kachmar N., Ivankiv M., Datsko T. Improving the soil barrier functions under the threat of cadmium contamination in order to obtain ecologically safe yields of white cabbage

Soil is a specific component of the biogeosphere. It is able to accumulate pollutants and is the natural buffer for them. Soil is an intermediate or final link in the translocation of chemical elements and various compounds in the cycle:

atmosphere – hydrosphere – living matter – lithosphere. Approximately 90 % of heavy metals (HM) entering the environment are accumulated in soils, polluting the adjacent environments and biota, or undergo sedimentation (fixation in the solid phase). The influx of such heavy metals as Cd, Pb, Zn, Ni, Hg into agroecosystems significantly exceeds the natural removal of them and inclusion in the biogeochemical cycle. All main cycles of the natural migration of heavy metals in the biogeosphere (aqueous, atmospheric, biotic) begin with the lithosphere. Anthropogenic pollution of soils complements these cycles, and if soils do not «cope» with their sedimentation, or poorly «work» as buffers, additional agrotechnical measures are needed to prevent contamination of agricultural products with heavy metals. It is in the soil that their mobilization and formation of various migratory forms and toxic backgrounds takes place. The vast majority of heavy metals that have reached the soil surface are retained by organic components (fixed in the upper humus horizons) or fixed by its mineral component and undergo sedimentation.

To improve the barrier functions of the soil which is contaminated with heavy metals in order to obtain ecologically safe agricultural products, organic and bacterial fertilizers are applied, siderates are used, proper rotation of crops is carried out in crop rotation, complex mineral fertilizers and calcium ameliorants are rationally used, that help maintain favorable physical and chemical properties of the soil and increase its fertility. These and other measures increase the buffering capacity and sedimentation potential of soils in relation to mobile forms of heavy metals and other xenobiotics.

The research has established, that the use of an organic and organic-mineral fertilizer system in combination with liming of the soil at the norm of Biohumus 8 t/ha + CaCO₃ 5 t/ha and N₆₄P₆₄K₆₄+ Biohumus 4 t/ha + CaCO₃ 5 t/ha contributes to activation of the soil barrier functions, which has been manifested in a decrease in the mobility of Cd²⁺ ions in the soil and a decrease in their translocation into white cabbage plants at all levels of the simulated soil contamination with cadmium.

It was found that the lowest concentration of mobile forms of cadmium in the soil of 0.051 and 0.063 mg/kg, the lowest transition of the element from the gross form to the mobile form of 3.30 and 4.67 % with a hazard ratio of 0.07 and 0.09 was noted on the control background in specified variants of the experiment. Accordingly, on these variants, the hazard coefficients of element concentration in heads of cabbage were also the lowest (0.13 and 0.21), which indicated the ecological safety products of white cabbage and the feasibility of using methods of chemical reclamation of the soil contaminated with heavy metals. A strong correlation ($r = 0.96$) was found between the concentration of mobile forms of Cd²⁺ in the soil and the concentration of the element in white cabbage plants.

Key words: pollution, sedimentation, soil buffering, white cabbage, heavy metals, mobility, ion translocation, ameliorants, fertilizers.

Постановка проблеми. В умовах антропогенного навантаження на агроєкосистеми на особливу увагу заслуговує контроль у ґрунті за важкими металами (ВМ), такими як кадмій, ртуть, свинець, миш'як, котрі належать до першого класу небезпеки хімічних речовин [6]. Забруднення агробіоценозів важкими металами негативно позначається на екологічних функціях ґрунту, а відтак змінює його фізико-хімічні властивості та пригнічує мікробіологічні процеси, погіршуючи тим самим родючість [5].

Токсичний вплив мають важкі метали у ґрунті, розташовані в рухомій формі, які й визначають рівень небезпечності для сільськогосподарських рослин, а відтак і для людини [8]. Фітотоксичність та нагромадження рослинами важких металів проявляються у порушенні всіх фізіолого-біохімічних та ростових процесів, що в результаті позначається на зниженні врожайності та якості продукції рослинництва [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одне з екологічних функціональних призначень ґрунту як геохімічного бар'єру – його здатність затримувати забруднювачі. Виконання бар'єрних функцій ґрунту визначається стійкістю до

забруднення системи ґрунт-ґрунтова вода, здатністю перешкоджати надходженню токсикантів до біологічного кругообігу – стійкістю системи ґрунт-рослина, здатністю забезпечувати умови мешкання організмів – стійкістю ґрунтового мікробіоценозу [10].

Функціональна стійкість ґрунту до транслокації елементів тісно пов'язана з його хімічним і мінералогічним складом, фізико-хімічними та водно-фізичними властивостями. Затримання елементів супроводжується зміною стану фізико-хімічної та дисперсної системи ґрунту, і навпаки – зміна властивостей ґрунту призводить до зміни буферної ємності ґрунту загалом [9].

Стійкість ґрунту вважають мірою зовнішнього впливу щодо відгуку системи, а буферність – мірою внутрішньосистемних сил, які компенсують цей вплив. Тому на вищих рівнях організації ґрунту використовують термін «функціональна стійкість». Стійкість бар'єрних функцій ґрунту безпосередньо пов'язана з його станом як фізико-хімічної й дисперсної систем [2].

На забруднених важкими металами ґрунтах при різних рівнях вмісту їх валових і рухомих форм, для всіх ґрунтів спостерігається єдина тенденція. На тлі зростання валових запасів ВМ

(від дерново-підзолистих ґрунтів до чорноземів), кількість металів у рухомих формах зменшувалася. Проте найбільш небезпечною є та кількість важких металів, яка міститься у рухомій та потенційно рухомій формі, спроможній переходити з твердої фази ґрунту у ґрунтовий розчин, оскільки саме вона визначає рівень небезпечності важких металів для ґрунтової біоти, рослин, тварин та в підсумку – для людини [11].

Капуста білоголова (*Brassica oleracea var. capitata* L.) – поширена в Україні овочева культура. Проте біологічна стійкість (толерантність) цієї рослини до токсичної дії йонів важких металів незначна, що зумовлено генетично. Так, підвищені рівні рухомих форм Cd^{2+} та Pb^{2+} у ґрунті здатні знижувати врожайність, нагромаджуватись у рослинах та, найважливіше, – погіршувати якість капусти білоголової [2; 7].

Тому сьогодні актуальним питанням є вивчення та застосування у конкретних ґрунтово-кліматичних умовах ефективної та безпечної системи удобрення у поєднанні з кальцієвими меліорантами, завдяки якій відбуваються швидкодіюча детоксикація ґрунту із зниженням рухомості важких металів, підвищення родючості, а також зменшення транслокації катіонів ВМ у рослини, що загалом сприяє одержанню екологічно безпечної овочевої продукції [13].

Постановка завдання. Наше завдання – дослідити вплив добрив та кальцієвих меліорантів на активізацію бар'єрних функцій темно-сірого ґрунту до забруднення кадмієм за вирощування капусти білоголової (*Brassica oleracea var. capitata* L.); визначити коефіцієнти безпеки рухомих форм Cd^{2+} у ґрунті та концентрації елемента в рослинах капусти білоголової, а також встановити кореляційну залежність між рухомістю кадмію у ґрунті та нагромадження йонів металу в рослинах.

Виклад основного матеріалу. В умовах Західного Лісостепу України на темно-сірих опідзолених ґрунтах досліджували вплив добрив та меліорантів на поведінку важких металів у системі «ґрунт-рослина», зокрема вивчали потенціал бар'єрних функцій ґрунту за безпеки забруднення кадмієм у модельних дослідах за вирощування капусти білоголової з визначенням концентрації йонів металу у ґрунті та в рослинах.

Капусту білоголову (сорт Ярославна) висівали у третій декаді квітня в попередньо забруднений важкими металами ґрунт. Як забруднювачі використовували сіль $CdCl_2$, яку вносили водним розчином за змодельованих рівнів забруднення 1;

3; 5 ГДК (валових форм) окремо восени, а через два тижні вносили меліорант (вапнякове борошно) $CaCO_3$ у нормі 5 т/га (за гідролітичною кислотністю) згідно зі схемою досліду [5]. При цьому враховували [8], що ГДК валових форм для Cd становить 3 мг/кг ґрунту. У контрольному варіанті солі кадмію не вносили. Навесні під культивування застосовували мінеральне добриво нітроаммофоску марки 16:16:16 та органічне добриво Біогумус (продукт вермикюльтури) згідно зі схемою досліду, які занесені у Державний реєстр пестицидів і агрохімікатів, дозволених до використання в Україні.

Схема мікроділянкового двофакторного досліду за вирощування капусти білоголової передбачала такі варіанти: 1) Контроль (без добрив); 2) $N_{136}P_{136}K_{136}$; 3) Біогумус, 8,0 т/га; 4) $N_{64}P_{64}K_{64}$ + Біогумус, 4,0 т/га; 5) $N_{136}P_{136}K_{136}$ + $CaCO_3$ 5,0 т/га; 6) Біогумус, 8,0 т/га + $CaCO_3$ 5,0 т/га; 7) $N_{64}P_{64}K_{64}$ + Біогумус, 4,0 т/га + $CaCO_3$ 5,0 т/га.

Облікова площа однієї мікроділянки – 2 м². Повторність досліду п'ятиразова, розміщення варіантів систематичне [1]. Ґрунт дослідного поля темно-сірий сірий опідзолений легкосуглинковий в орному горизонті (0–20 см), характерний такими агрохімічними показниками: $pH_{\text{сол.}}$ – 5,4–5,6, гідролітична кислотність – 3,49–3,62 мг-екв./100 г ґрунту, сума увібраних основ – 11,0–12,2 ммоль/100 г ґрунту, вміст гумусу – 2,29–2,32 %, забезпеченість легкогідролізованим азотом – 118–124 мг/кг, рухомих фосфором – 97–110 мг/кг, обмінним калієм – 88–95 мг/кг [5; 10]. Технологія вирощування капусти білоголової загальноприйнята для умов Західного Лісостепу України.

Концентрацію кадмію в рослинних та ґрунтових зразках визначали методом атомно-адсорбційної спектрофотометрії на приладі С115М за атестованими і стандартизованими методиками [3].

Для оцінки ступеня небезпечності елемента-забруднювача (Cd) використовували коефіцієнт безпеки (K_n) – співвідношення між концентрацією полютанта у ґрунті чи рослині та його гранично допустимою концентрацією за формулою (1). За нормальних умов K_n має бути меншим або дорівнювати 1:

$$K_n = \frac{C_i}{ГДК_i} \geq 1, \quad (1)$$

де: C_i – концентрація i -тої забруднювальної речовини, мг/кг; $ГДК_i$ – гранично допустима концентрація i -тої забруднювальної речовини, мг/кг.

Для кількісної оцінки надходження (транслокації) рухомих форм важких металів із ґрунту в

рослини використовували коефіцієнт біологічного накопичення ($K_{би}$) за формулою (2):

$$K_{би} = \frac{C_p}{C_z}, \quad (2)$$

де: C_p – концентрація забруднювальної речовини у рослині, мг/кг; C_z – концентрація забруднювальної речовини у ґрунті, мг/кг [14].

За результатами трирічних досліджень встановлено, що буферність ґрунту до забруднення кадмієм проявлялася у зміні рухомості катіонів Cd^{2+} у ґрунті, їх здатності до транслокації у рослини капусти білоголової та залежала від ґрунтово-кліматичних умов року, внесених норм органічних і мінеральних добрив, кальцієвих меліорантів, агрохімічних параметрів ґрунту, а також від змодельованих рівнів забруднення.

Із збільшенням градації змодельованих рівнів забруднення ґрунту кадмієм від 1 до 5 ГДК збільшувалась і концентрація рухомих форм Cd^{2+} у ґрунті у всіх варіантах дослідження за ймовірної різниці до фону $p < 0,01-0,001$. Проте загальні закономірності рухомості важких металів у ґрунті за вирощування капусти білоголової між варіантами зберігалися на кожному рівні забруднення (табл. 1).

Крім того, за внесення добрив і меліорантів спостерігали загальну тенденцію, а саме із зменшенням рухомості йонів кадмію (перехід елемента із валової форми у рухому), зменшувалась відповідно і концентрація рухомих форм Cd^{2+} у ґрунті, знижувалися коефіцієнти їх безпеки, проте збільшувалась концентрація валових фракцій, які переходили у більш стійкі й недоступні ґрунтовій біоті та рослинам капусти білоголової комплекси.

Встановлено, що в усіх варіантах за внесення добрив та меліорантів концентрація рухомих форм Cd^{2+} у ґрунті була значно меншою порівняно з контролем – без добрив ($p < 0,05-0,001$), що свідчить про підвищення буферної та седиментаційної функцій темно-сірого ґрунту стосовно рухомих сполук кадмію. Так, спільне застосування органічних і мінеральних добрив у половину норми $N_{68}P_{68}K_{68}$ + Біогумус 4 т/га (вар. 4) виявилось більш ефективним у зв'язуванні катіонів Cd^{2+} у ґрунті, аніж внесення тільки мінерального добрива у повній нормі $N_{136}P_{136}K_{136}$ (вар. 2). Однак за внесення в повній нормі органічного добрива Біогумус 8 т/га (вар. 3) рухомі фракції кадмію ще міцніше закріплювалися ґрунтово-вбирним комплексом.

Утім за внесення тих самих норм органічних і мінеральних добрив, але на провапно-

ваному ґрунті (вар. 5–7), концентрація лабільних форм кадмію суттєво знизилась порівняно з іншими варіантами дослідження за ймовірної різниці до контролю – без добрив $p < 0,01-0,001$. Зниження кислотності ґрунту за внесення кальцієвих меліорантів підвищило буферну стійкість ґрунту та мало сильний вплив на зменшення рухомості йонів Cd^{2+} у ґрунті.

За результатами досліджень встановлено, що на фоні (контроль) найменшу концентрацію рухомих форм кадмію (0,051 і 0,063 мг/кг) у ґрунті виявлено за внесення Біогумус 8 т/га + 5 т/га $CaCO_3$ та $N_{68}P_{68}K_{68}$ + Біогумус 4 т/га + 5 т/га $CaCO_3$. У цих варіантах дослідження виявили найменший перехід кадмію (3,30 та 4,67 %) з валової форми у рухому, а відповідно, найменші коефіцієнти безпеки – 0,07 та 0,09.

На змодельованому рівні забруднення ґрунту 5 ГДК за використання повної норми мінеральних добрив $N_{136}P_{136}K_{136}$ (вар. 2) та органічних добрив Біогумус 8 т/га (вар. 3) концентрація рухомих форм Cd^{2+} у ґрунті становила 1,068 та 0,873 мг/кг, перехід елемента з валової форми у рухому – 31,22 та 22,28 %, при коефіцієнті безпеки 1,53 та 1,25 за ймовірної різниці до фону $p < 0,001$. Найвищий коефіцієнт безпеки – 1,91, а відповідно найбільшу концентрацію рухомих форм кадмію у ґрунті – 1,338 мг/кг – встановлено у контрольному варіанті (без добрив).

Визначено, що за внесення органічної (вар. 6) та орґано-мінеральної (вар. 7) систем удобрення на фоні вапнування ґрунту за рівня змодельованого забруднення ґрунту кадмієм 5 ГДК концентрація рухомих форм кадмію у ґрунті була найнижчою і становила 0,652 та 0,692 мг/кг, що менше за контроль (без добрив) на 0,686 та 0,646 мг/кг сухого ґрунту, або 51,2 та 48,2 % за ймовірної різниці до фону $p < 0,001$. У зазначених варіантах коефіцієнт безпеки був також найменшим, відповідно 0,93 та 0,99.

У результаті трирічних досліджень встановлено, що із збільшенням рівнів забруднення від 1 до 5 ГДК збільшувалась і концентрація рухомих форм Cd^{2+} у ґрунті у всіх варіантах, що позначилось на інтенсивнішому нагромадженню йонів рослинами капусти білоголової (табл. 2).

Визначено, що у зовнішньому качані концентрація кадмію у 3,92–4,76 рази була більшою, аніж у головці (істивній частині), оскільки корінь капусти білоголової та зовнішній качан є першим органом і біологічним бар'єром на шляху транспорту катіонів Cd^{2+} з ґрунту в рослини.

Таблиця 1

Вплив добрив та меліорантів на концентрацію валових і рухомих форм кадмію у ґрунті при змодельованих рівнях забруднення за вирощування капусти білоголової (середнє за три роки)

Варіант	Рівні змодельованого забруднення ґрунту кадмієм (Cd ²⁺)											
	Фон (контроль)			1 ГДК			3 ГДК			5 ГДК		
	Концентрація кадмію у ґрунті, мг/кг	Перехід елементів з валової форми у рухому, %	Коефіцієнт небезпеки (K _n) рухомих форм	Концентрація кадмію у ґрунті, мг/кг	Перехід елементів з валової форми у рухому, %	Коефіцієнт небезпеки (K _n) рухомих форм	Концентрація кадмію у ґрунті, мг/кг	Перехід елементів з валової форми у рухому, %	Коефіцієнт небезпеки (K _n) рухомих форм	Концентрація кадмію у ґрунті, мг/кг	Перехід елементів з валової форми у рухому, %	Коефіцієнт небезпеки (K _n) рухомих форм
1) Без добрив (контроль)	$\frac{0,156}{0,730}$	21,36	0,22	$\frac{0,357^{**}}{1,450^{**}}$	24,64	0,51	$\frac{0,802^{***}}{2,870^{***}}$	27,93	1,15	$\frac{1,338^{***}}{3,250^{***}}$	41,17	1,91
2) N ₁₃₆ P ₁₃₆ K ₁₃₆	$\frac{0,112^+}{0,820^+}$	13,66	0,16	$\frac{0,274^{**}}{1,560^{**}}$	17,59	0,39	$\frac{0,633^{***}}{2,830^{***}}$	22,37	0,90^{***}	$\frac{1,068^{***}}{3,420^{***}}$	31,22	1,53
3) Біогумус 8 т/га	$\frac{0,090^{++}}{0,960^+}$	9,37	0,13	$\frac{0,235^{**}}{1,730^{**}}$	13,58	0,34	$\frac{0,547^{***}}{3,180^{***}}$	17,19	0,78	$\frac{0,873^{***}}{3,920^{***}}$	22,28	1,25
4) N ₆₈ P ₆₈ K ₆₈ + Біогумус 4 т/га	$\frac{0,096^{++}}{0,890^+}$	10,81	0,14	$\frac{0,252^{**}}{1,680^{**}}$	15,02	0,36	$\frac{0,617^{***}}{2,910^{***}}$	21,19	0,88	$\frac{1,010^{***}}{3,630^{***}}$	27,83	1,44
5) N ₁₃₆ P ₁₃₆ K ₁₃₆ + CaCO ₃ 5 т/га	$\frac{0,074^{++}}{1,130^{++}}$	6,54	0,11	$\frac{0,197^{**}}{1,950^{**}}$	10,12	0,28	$\frac{0,486^{***}}{3,460^{***}}$	14,04	0,69	$\frac{0,752^{***}}{4,330^{***}}$	17,36	1,07
6) Біогумус 8 т/га + CaCO ₃ 5 т/га	$\frac{0,051^{+++}}{1,550^{+++}}$	3,30	0,07	$\frac{0,136^{***}}{2,650^{**}}$	5,15	0,19	$\frac{0,337^{***}}{4,120^{***}}$	8,19	0,48	$\frac{0,652^{***}}{6,250^{***}}$	10,43	0,93
7) N ₆₈ P ₆₈ K ₆₈ + Біогумус 4 т/га + CaCO ₃ 5 т/га	$\frac{0,063^{+++}}{1,350^{+++}}$	4,67	0,09	$\frac{0,186^{**}}{2,180^{**}}$	8,53	0,27	$\frac{0,410^{***}}{3,620^{***}}$	11,33	0,59	$\frac{0,692^{***}}{4,590^{***}}$	15,08	0,99

Примітки: 1. Чисельник – концентрація рухомих форм Cd²⁺, знаменник – концентрація валових форм Cd; 2. + – r < 0,05; ++ – r < 0,01, +++ – r < 0,001, різниця ймовірна між показниками на фоні порівняно до контролю – без добрив; 3. ** – r < 0,01; *** – r < 0,001, різниця ймовірна між показниками на змодельованих рівнях забруднення ґрунту кадмієм порівняно з фоном. 4. ГДК рухомих форм Cd²⁺ – 0,7 мг/кг повітряно-сухого ґрунту.

Таблиця 2

Концентрація кадмію в рослинах капусти білоголової залежно від рівнів змодельованого забруднення ґрунту за використання добрив та меліорантів, мг/кг маси сирої речовини (середнє за три роки)

Варіант	Рівні змодельованого забруднення ґрунту кадмієм (Cd ²⁺)											
	Фон (контроль)			1 ГДК			3 ГДК			5 ГДК		
	Вміст Cd в рослині, мг/кг	К.н.	К.б.н.	Вміст Cd в рослині, мг/кг	К.н.	К.б.н.	Вміст Cd в рослині, мг/кг	К.н.	К.б.н.	Вміст Cd в рослині, мг/кг	К.н.	К.б.н.
1) Без добрив (контроль)	0,017 0,081	0,57 2,70	0,109 0,518	0,022 0,097	0,73 3,23	0,062 0,272	0,038 0,159	1,27 5,30	0,047 0,198	0,068 0,267	2,27 8,90	0,051 0,200
2) N ₁₃₆ P ₁₃₆ K ₁₃₆	0,013* 0,064*	0,43 2,13	0,116 0,571	0,015* 0,073*	0,50 2,43	0,055 0,266	0,026** 0,117*	0,87 3,90	0,041 0,185	0,051* 0,208*	1,70 6,93	0,048 0,195
3) Біогумус 8 т/га	0,010** 0,053**	0,33 1,76	0,111 0,588	0,012** 0,070**	0,40 0,33	0,051 0,298	0,020** 0,106**	0,67 3,53	0,037 0,198	0,035** 0,165**	1,17 5,50	0,040 0,189
4) N ₆₈ P ₆₈ K ₆₈ + Біогумус 4 т/га	0,011** 0,058*	0,37 1,93	0,114 0,603	0,013** 0,066**	0,43 0,20	0,052 0,262	0,024** 0,108**	0,80 3,60	0,039 0,175	0,042** 0,196*	1,40 6,53	0,043 0,194
5) N ₁₃₆ P ₁₃₆ K ₁₃₆ + CaCO ₃ 5 т/га	0,008** 0,044**	0,26 1,80	0,108 0,594	0,010** 0,062**	0,33 2,07	0,051 0,315	0,016*** 0,094**	0,53 3,13	0,033 0,193	0,030*** 0,153**	1,00 5,10	0,040 0,203
6) Біогумус 8 т/га + CaCO ₃ 5 т/га	0,004*** 0,029***	0,13 0,96	0,078 0,567	0,006*** 0,043***	0,20 1,43	0,044 0,316	0,011*** 0,072**	0,37 2,40	0,033 0,214	0,023*** 0,135**	0,77 4,50	0,035 0,207
7) N ₆₈ P ₆₈ K ₆₈ + Біогумус 4 т/га + CaCO ₃ 5 т/га	0,006*** 0,036***	0,21 1,20	0,095 0,571	0,008*** 0,055**	0,27 1,83	0,043 0,296	0,013*** 0,081**	0,43 2,70	0,032 0,198	0,026*** 0,139**	0,87 4,63	0,038 0,201
		0,063			0,186			0,410			0,692	

Примітки: 1. Чисельник – концентрація Cd у голові, знаменник – концентрація Cd у зовнішньому качані; 2. # – концентрація рухомих форм Cd²⁺ у ґрунті, мг/кг; 3. * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$, різниця ймовірна до контролю (без добрив); 4. К.н. – коефіцієнт небезпеки, К.б.н. – коефіцієнт біологічного накопичення, ГДК Cd в овочах – 0,03 мг/кг маси сирої речовини.

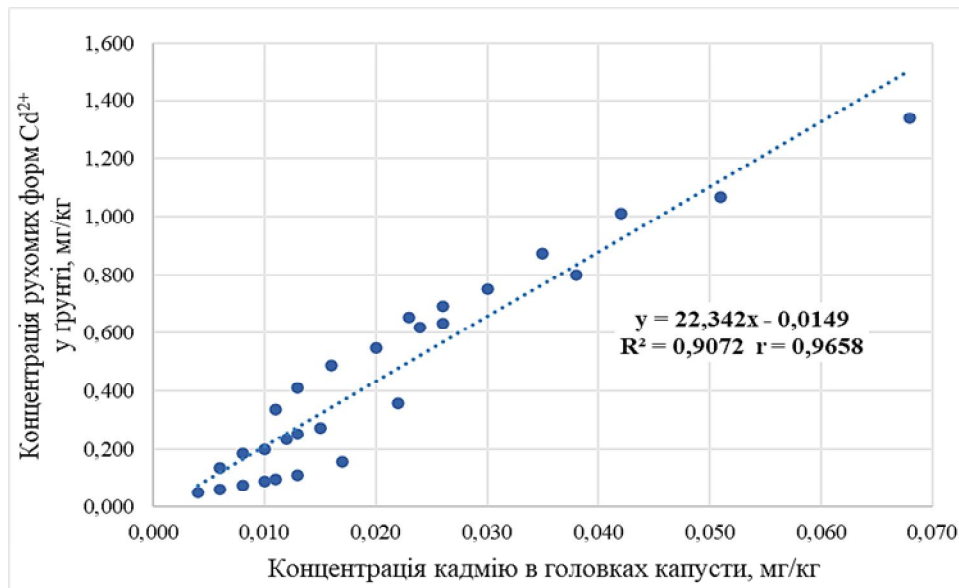


Рис. Графік кореляційної залежності між концентрацією рухомих форм Cd^{2+} у ґрунті та концентрацією кадмію в рослинах капусти білоголової за внесення добрив і меліорантів

За результатами проведених досліджень розраховували коефіцієнт небезпеки (*К.н.*) та коефіцієнт біологічного накопичення (*К.б.н.*). Зазначимо, що *К.б.н.* зменшувався із збільшенням рівнів змодельованого забруднення ґрунту кадмієм. Проте виявився менш інформативним порівняно з *К.н.* і не показав очевидної закономірності між концентрацією рухомих форм кадмію у ґрунті та нагромадженням цього елемента в рослинах капусти білоголової.

Тому для кращого розуміння бар'єрних функцій ґрунту за небезпеки забруднення кадмієм залежно від внесених добрив та меліорантів на всіх рівнях змодельованого забруднення провели кореляційний аналіз між концентрацією рухомих форм Cd^{2+} у ґрунті та концентрацією елемента в рослинах капусти білоголової (рис.).

За результатами кореляційного аналізу встановлено сильний кореляційний зв'язок ($r = 0,96$) між концентрацією рухомих форм Cd^{2+} у ґрунті та нагромадженням кадмію в головках капусти білоголової за коефіцієнта детермінації $R = 0,91$.

Визначено, що у контрольному варіанті (без добрив) за рівня забруднення 1 ГДК (Cd) концентрація кадмію в головках капусти становила 0,022 мг/кг, а у зовнішньому качані – 0,097 мг/кг маси сирої речовини, що майже у 4,4 раза більше, аніж у головці. Коефіцієнт небезпеки у цьому варіанті становив відповідно 0,73 (для головки) та 3,23 для зовнішнього качана. Виявлено, що на цьому ж рівні забруднення у вар. 6 за внесення

органічних добрив та меліорантів у нормі Біогумус у нормі 8 т/га + 5 т/га $CaCO_3$ концентрація кадмію в головках капусти знизилась до 0,006 мг/кг маси сирої речовини за ймовірної різниці до контролю $p < 0,001$ за *К.н.* – 0,20.

На рівні змодельованого забруднення ґрунту 3 ГДК концентрація Cd в головках капусти перевищила ГДК тільки на контролі (без добрив) за *К.н.* – 1,27. Найменшу концентрацію йонів Cd^{2+} у рослинах капусти (на цьому рівні забруднення) виявили за внесення добрив і меліорантів у нормі Біогумус 8 т/га + 5 т/га $CaCO_3$ та $N_{68}P_{68}K_{68}$ + Біогумус 4 т/га + 5 т/га $CaCO_3$, відповідно 0,011 та 0,013 мг/кг маси сирої речовини ($p < 0,001$).

Добрива та меліоранти суттєво впливали на зниження транслокації йонів кадмію з ґрунту в рослини капусти білоголової навіть за змодельованого рівня забруднення ґрунту кадмієм 5 ГДК. Так, за внесення Нітроамофоски у повній нормі $N_{136}P_{136}K_{136}$ (вар. 2) концентрація йонів Cd^{2+} у головках капусти становила 0,051 мг/кг за ймовірної різниці до контролю $p < 0,05$, а *К.н.* – 1,70. За внесення Біогумусу 8 т/га (вар. 3) концентрація кадмію в головках становила 0,035 мг/кг сирої маси ($p < 0,01$) при коефіцієнті небезпеки 1,17. Проте за внесення $N_{68}P_{68}K_{68}$ + Біогумус 4 т/га (вар. 4) концентрація Cd^{2+} в головках становила 0,042 мг/кг ($p < 0,01$), тоді як у зовнішньому качані – 0,196 мг/кг маси сирої речовини ($p < 0,05$), при коефіцієнтах небезпеки – 1,40 (головка) та 6,53 (зовнішній качан). Найменшу концентрацію кадмію в головках капусти біло-

голової (0,023 та 0,026 мг/кг маси сирової речовини) виявили у 6-му та 7-му варіантах досліджу за ймовірної різниці до контролю $p < 0,001$ та коефіцієнта небезпеки 0,77 та 0,87.

Висновки. Застосування органічної та органо-мінеральної системи удобрення у поєднанні з вапнуванням ґрунту у нормі Біогумус 8 т/га + СаСО₃ 5 т/га та N₆₄P₆₄K₆₄+ Біогумус 4 т/га + СаСО₃ 5 т/га сприяло підвищенню бар'єрних функцій ґрунту стосовно рухомих форм кадмію. Унаслідок позитивної дії вказаних прийомів агротехніки спостерігали зниження рухомості йонів Cd²⁺ у ґрунті та зменшення їх транслокації в рослини капусти білоголової на всіх рівнях змодельованого забруднення. Відповідно у зазначених варіантах досліджу виявили найменший коефіцієнт небезпеки для рухомих форм кадмію у ґрунті та концентрації елемента в рослинах капусти білоголової. Це свідчить про екологічну безпечність продукції капусти білоголової та доцільність застосування методів хімічної меліорації ґрунтів, забруднених важкими металами. Виявлено сильний кореляційний зв'язок ($r = 0,96$) між концентрацією рухомих форм Cd²⁺ у ґрунті та концентрацією елемента в рослинах капусти білоголової.

Бібліографічний список

1. Бондаренко Г. Л., Яковенко К. І. Методика дослідної справи в овочівництві і баштанництві. Харків: Основа, 2001. 370 с.
2. Гуральчук Ж. З. Фітотоксичність важких металів та стійкість рослин до їх дії. Київ: Логос, 2006. 208 с.
3. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. Москва: Гидрометеоздат, ЦИНАО, 1992. 61 с.
4. Мислива Т. М., Надточій П. П., Герасимчук Л. О. Ведення сільськогосподарського виробництва у приватному секторі в умовах посиленого антропогенного впливу на навколишнє середовище. Житомир, 2011. 52 с.
5. Надточій П. П., Мислива Т. М., Вольвач Ф. В. Екологія ґрунту: монографія. Житомир: ПП Рута, 2010. 473 с.
6. Рідей Н. М., Строкаль В. П., Рибалко Ю. В. Екологічна оцінка агробіоценозів: теорія, методика, практика. Херсон: Олді-плюс, 2011. 258 с.
7. Снітинський В., Дидів А. Біохімічний склад капусти білоголової залежно від рівня забруднення ґрунту кадмієм і свинцем за використання меліорантів та різних систем удобрення. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агрономія*. 2016. № 20. С. 3–13.
8. Фатєєв А. І., Самохвалова В. Л. Детоксикація важких металів у ґрунтовій системі: методичні рекомендації. Харків: КП «Міськдрук», 2012. 70 с.
9. Фатєєв А. І., Самохвалова В. Л., Мірошніченко М. М., Бородіна Я. В. Діагностика стану хімічних елементів системи ґрунт-рослина: методика. Харків: КП «Міськдрук», 2012. 146 с.
10. Хімічна меліорація ґрунтів (концепція інноваційного розвитку) / за ред. С. А. Балюка, Р. С. Трускавецького. Харків: «Міськдрук», 2012. 129 с.
11. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th Edition. Boca Raton, FL: Crc Press, 2011. 505 p.
12. Mirosznichenko N. N., Pashchenko Ya. V., Fateeov A. I. Buffering and resilience parameters for evaluating the barrier function of soils. *Eurasian Soil Sciencethis*. 2003. № 36 (7). 724–732 pp.
13. Snitynskyi V., Dydiv A. The mobility of cadmium and lead in soil and their impact on the quality of beetroot (*Beta vulgaris* L.) with different systems of fertilization. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wroclawiu: seria rolnictwo*. 2017. CXXII (625). Str. 87–98.

Стаття надійшла 26.09.2022