

Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»

RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

КОРЕЛЯЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ВМІСТУ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У КОРМАХ ТА ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДАХ ТВАРИННИЦТВА З ОЦІНКОЮ ЕКОЛОГІЧНОГО РИЗИКУ ЗАБРУДНЕННЯ АГРОЕКОСИСТЕМ ПОЛЮТАНТАМИ

С. В. Портянник¹, О. М. Маменко², О. М. Кондратенко³¹Інститут свинарства і агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України, Полтава, Україна²Інститут тваринництва Національної академії аграрних наук України, Харків, Україна³Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

УДК 63:632.2:502:519.2

DOI: 10.52363/2522-1892.2025.1.9

Отримано: 10 березня 2025

Прийнято: 24 квітня 2025

Cite as: Portiannyk S., Mamenko O., Kondratenko O. (2025). Correlation analysis of heavy metal content in animal feed and organic waste with assessment of the ecological risk of contamination of agroecosystems by pollutants. *Technogenic and ecological safety*, 17(1/2025), 81–91. doi: 10.52363/2522-1892.2025.1.9

Анотація

Екотоксиканти важкі метали представляють значну загрозу для довкілля у різних країнах світу і Україні. Після закінчення бойових дій екологічна ситуація в агроєкосистемах буде більш складною. Метод кореляційного аналізу один зі статистичної обробки даних, що за правильного застосування дозволяє швидко встановити силу зв'язку між показниками і його статистичну вірогідність. Оцінка екологічного ризику за допомогою отриманих в наукових експериментах результатів лабораторного аналізу кормів для продуктивних корів та їх органічних відходів на вміст важких металів Cd, Pb має важливе значення. Дані методи дослідження застосовуються в практиці вчених з країн Європейського Союзу, США, Китаю. Досліди проведено на дійних коровах. Годівля – різними типами. Раціон містив корми з надлишком поллютантів. Висока еко-токсичність Cd, Pb вплинула на міграцію їх з кормів у продукцію, органічні відходи. Метою досліджень є аналіз кореляційної залежності між вмістом кадмію та свинцю в кормах для тварин і їх органічних відходах з оцінкою ризику забруднення ґрунту поллютантами, після застосування органічних відходів як органічного добрива. Програмою STATISTICA версії 10.0, тестом Шапіро-Уїлка було перевірено відповідність отриманих даних лабораторних аналізів кормів і органічних відходів на вміст важких металів, закону «нормально-го» розподілу. Вибрано для розрахунку необхідний непараметричний ранговий коефіцієнт кореляції Спірмена. Статистичний аналіз показав високу $r = 0,66...0,75$ (кадмій) ($p < 0,05$), $r = 0,66...0,77$ (свинець) ($p < 0,05$), дуже високу $r = 0,83$ (кадмій) ($p < 0,05$), $r = 0,83$ (свинець) ($p < 0,05$) кореляційну залежність між концентрацією токсикантів у кормах та органічних відходах, що дозволяє фахівцям-екологам швидко та ефективно діяти в умовах виробництва, проводити екологічний моніторинг, прогнозувати екологічну ситуацію агробіогеоценозів, оцінювати екологічні ризики в тому числі щодо ведення екологічно безпечного органічного землеробства. Подальші дослідження – кореляційний аналіз за іншими важливими у виробничій практиці показниками екобезпеки.

Ключові слова: екотоксиканти, агробіогеоценоз, небезпека забруднення, продуктивні тварини, навколишнє середовище, екологічна безпека, технології захисту навколишнього середовища.

Постановка проблеми.

Екомоніторинг агробіогеоценозів показує значні техногенні навантаження важких металів на території агропідприємств з утримання сільськогосподарських тварин в тому числі великої рогатої худоби. З початком повномасштабної війни 2022 року екологічна ситуація значно ускладнилася і набула надзвичайної загрози [1–3]. Техногенні забруднення довкілля призводять до погіршення стану води, ґрунту, рослинності. Збільшення вмісту важких металів у ґрунті є наслідком недотримання допустимих норм застосування органічних добрив отриманих з відходів тваринництва, особливо коли тваринам згодовувалися корми з підвищеною концентрацією небезпечних токсикантів Cd, Pb. Екотоксиканти, важкі метали – значна загроза для аграрного виробництва, отримання екологічно безпечної продукції молока, м'яса і ін., що споживається людиною. Забруднення ґрунту кадмієм, свинцем і іншими важкими металами має потенційний екологічний ризик, забруднення рослинної продукції може спричинити ризик для здоров'я людини [4] виникнення небезпечних онкозахворювань [5]. Проблема забруднення біосфери, агроєкосистем важкими металами досить

гостра в багатьох країнах світу особливо у Китаї [6]. Серед важких металів найбільш небезпечними є кадмій, свинець, ртуть, миш'як, хром. Такі поллютанти всюдисущі і їх вплив на довкілля не прогнозований [7–9].

Cd, Pb разом з кормами раціону потрапляють в організм сільськогосподарських тварин в тому числі продуктивних корів, легко всмоктуються в органах травлення у кров, потрапляють в молоко, виводяться з екскрементами калом і сечею [10]. Оцінити ризик забруднення довкілля його агроєкосистем, прогнозувати розвиток екологічної ситуації, стан екологічної безпеки досить важко. За результатами наукових досліджень необхідно розробляти більш сучасні простіші і дієвіші методи для оцінювання екологічних ризиків в агроєкосистемах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз екологічної ситуації вітчизняними вченими [3] в Україні показує, що забруднення довкілля важкими металами протягом останніх десятиліть збільшилося. Особливо ситуація ускладнилася під час війни. За прогнозами і у післявоєнний час стан довкілля, агроєкосистем буде складним [3].

Дослідники з Англії [11] вважають ґрунт довготривалим поглиначем і утримувачем важких металів, у ньому поллютанти знаходяться сотні, іноді й тисячі років. Тому вчені більше уваги приділяють кількісному визначенню важких металів у ґрунті з оцінкою їх щодо найбільшої вразливості забруднення. Нами теж опубліковано такі результати досліджень. Лише тоді можна прогнозувати та управляти потенційними ризиками щоб зменшити негативний вплив на стан агроєкосистем [11].

Науково-господарські досліді з вивчення міграції токсичних важких металів у трофічному ланцюзі та отримання великої кількості аналітичних цифрових даних лабораторних аналізів не завжди може встановити високу закономірність змін. Дослідники давно застосовують методи кореляційного аналізу показників результатів отриманих в процесі наукового експерименту. Вчені використовують різні комп'ютерні програми, алгоритми, але важливе значення при цьому має не лише сам аналіз сили кореляції між показниками, а й правильний вибір самих показників.

Китайські вчені застосовували кореляційний аналіз для виявлення співвідношення між токсичними важкими металами у морських осадах Гонконгу з 1991 по 2011 рік. На першому етапі застосовували рангову кореляцію Спірмена, далі Пірсона. Затока та гавань (Victoria) були забруднені важкими металами свинцем та міддю, що корелювало із забрудненням хромом, нікелем та цинком [12]. Дослідники [12] вважають, що саме вони вперше застосували подібний аналіз для дослідження забруднення довкілля, але такі методи вже широкого використовувалися вченими у біології, соціології, інформатиці тощо. Важливим фактом є те, що такий кореляційний аналіз можна застосовувати не тільки для морських відкладень водних екосистем, а й у інших екологічних системах, що саме і було зроблено нами.

Польськими вченими [13] досліджувалася кореляція біоаккумуляції важких металів у тканинах і органах (печінка) овець в тому числі м'язовій тканині з віком тварин. Вівці знаходилися у Східній Польщі. Експеримент показав, що з віком овець вміст води у м'язовій тканині зменшується, при цьому збільшується вміст білка, жиру, золи. Забруднення м'яса та печінки Cd та Pb залежить від віку тварин. Між наймолодшими тваринами та найстарішими було встановлено різницю у кілька разів за рівнем забруднення.

Кореляційний аналіз концентрації токсичних важких металів у ґрунті і рослинах, які вирощуються для оцінки ризику забруднення сільськогосподарських культур, прогнозування небезпеки шкідливого впливу поллютантів, особливо небезпечних Hg і Cd, на організм людини робили вчені [4]. Вони переважно звертали увагу на забруднення ґрунту і рослин екотоксикантами при цьому менше звертали увагу на зв'язок між ними. Результати аналізу показали, що досліджувані токсичні важкі метали у ґрунті мали найбільший вплив на рівень Zn в рослинах, Pb і Cr здійснювали синергічний вплив на поглинання Zn рослинами.

Наукові дослідження вчених доводять важливість кореляційної оцінки для контролю ризику забруднення, котра до цього не враховувалася.

Вітчизняні вчені [1] у своїх дослідженнях встановили вміст свинцю в сінні люцерновому $1,502 \pm 0,061 \dots 3,639 \pm 0,064$ мг/кг, соломі ячмінній $1,238 \pm 0,065 \dots 1,521 \pm 0,077$ мг/кг, силосі кукурудзяному $0,350 \pm 0,010 \dots 0,564 \pm 0,054$ мг/кг, сінажі люцерновому $1,080 \pm 0,057 \dots 1,342 \pm 0,209$ мг/кг, зерноsumіші $1,046 \pm 0,133 \dots 1,055 \pm 0,417$ мг/кг, макусі і шроті соняшниковому $1,904 \pm 0,067 \dots 2,464 \pm 0,101$ мг/кг, по кадмію відповідно в сінні люцерновому $0,240 \pm 0,015 \dots 0,404 \pm 0,058$ мг/кг, соломі ячмінній $0,199 \pm 0,028 \dots 0,241 \pm 0,045$ мг/кг, силосі кукурудзяному $0,052 \pm 0,004 \dots 0,116 \pm 0,009$ мг/кг, сінажі люцерновому $0,153 \pm 0,022 \dots 0,238 \pm 0,008$ мг/кг, зерноsumіші $0,227 \pm 0,030 \dots 0,133 \pm 0,024$ мг/кг, макусі і шроті соняшниковому $0,408 \pm 0,042 \dots 0,908 \pm 0,015$ мг/кг. Крім того концентрація в сінні люцерновому плумбуму становила $2,960 \pm 0,097$ мг/кг, а кадмію $0,290 \pm 0,053$ мг/кг, а в мелясі кормовій відповідно $0,7086 \pm 0,083$ та $0,118 \pm 0,031$ мг/кг. Науковці приходять висновку, що складність екологічної ситуації підтверджується високим вмістом важких металів у кормах та молоці корів. Інші вчені [14] в ході експерименту на сільськогосподарських тваринах встановили найбільшу концентрацію плумбуму у зерноsumіші до складу котрої було додано дерть люпинову $0,058$ мг/кг, а по кадмію в зерноsumіші з дертю пелюшки $0,031$ мг/кг.

Внесення органічних відходів тваринництва у вигляді компостів, котрі містять високі рівні токсичних важких металів, може призвести до їх надмірного накопичення у ґрунті, погіршення його якості [15]. Наприклад, вісімнадцяти кратне збільшення концентрації кадмію у ґрунті спостерігалось, коли свинячий гній вносили в ґрунт протягом сімнадцяти років на північному сході і півдні Китаю у порівнянні з контрольними ґрунтами. На контрольних ґрунтах або зовсім не вносилися добрива, або вносилися лише мінеральні добрива [16]. Забруднення ґрунту важкими металами є критичною проблемою Китаю, загальнонаціональні дослідження показують, що 19 % сільськогосподарських ґрунтів мають перевищення китайських екостандартів якості щодо даних поллютантів. Концентрації важких металів, таких як Cd, у ґрунті значно зросли за останні три десятиліття. Існує нагальна потреба моніторингу і мінімізації потрапляння важких металів у сільськогосподарські ґрунти. З цього витікає очевидний висновок, що такі особливості Китаю з негативними екологічними наслідками інтенсивного розвитку тваринництва необхідно буде враховувати в Україні у післявоєнний час на що спрямовані наші дослідження.

Вчені [17] вважають, що оцінка ризику є ключовим процесом управління навколишнім природним середовищем і процесом відновлення забруднення ґрунту. Такі важкі метали як берилій, кадмій, нікель та кобальт вважаються небезпечними забруднювачами ґрунту і обумовлюють екологічну проблему, котра спричиняє потенційний ризик для здоров'я людини.

Можна навести багато прикладів застосування кореляційного аналізу як у сільському господарстві, так і в інших сферах пов'язаних із забрудненням довкілля, виникненням надзвичайних ситуацій в різних країнах світу, але вивчення кореляційного зв'язку між вмістом токсичних важких металів у кормах раціону дійних корів і органічних відходах тваринництва зроблено нами вперше, що є актуальним дослідженням.

Фахівці агропідприємств регулярно здійснюють аналіз кормів для годівлі тварин на вміст макро-, мікроелементів, вітамінів в тому числі і щодо вмісту небезпечних важких металів, адже це впливає на якість та безпеку виробленої продукції, продуктивність тварин їх стан здоров'я, хімічний аналіз органічних відходів проводиться значно рідше, а часто і взагалі такий аналіз не проводиться. Органічні відходи зберігаються певний час у гноєсховищах, знезаражуються біологічним способом і тільки після цього вносяться на поля як органічні добрива під сільськогосподарські культури. Дослідження кореляційного зв'язку між вмістом токсичних важких металів у кормах і органічних відходах тварин є зручним та досить надійним індикатором прогнозу екологічної безпеки ґрунтів, оцінки екологічного ризику.

Постановка завдання та його вирішення.

Метою роботи є аналіз кореляційної залежності між концентрацією Cd та Pb в кормах, котрі застосовувалися в годівлі тварин і їх органічними відходами з оцінюванням ризику забруднення ґрунту токсичними важкими металами у агроєкосистемах сільськогосподарських підприємств з виробництва молока після застосування органічних відходів як органічного добрива.

Науково-господарські досліді було проведено на продуктивних тваринах дійних коровах червоно- та чорно-рябої молочної породи. Експериментом з виробництва екологічно безпечного молока передбачено оцінку екологічних ризиків забруднення агроєкосистем та моніторинг їх стану. Піддослідні тварини в господарствах утримувалися за різними типами годівлі силосно-сінажно-концентратним (126 голів), силосно-коренеплодним (36 голів), силосно-сінним (195 голів), силосно-сінажним (63 голови). У складі раціонів годівлі тваринам згодовувалися корми з вмістом Cd та Pb. Корми виготовлялися з рослин вирощених в звичайних умовах сільськогосподарських угідь. Порівняння встановлених концентрацій важких металів у кормах проводилося за [18].

Лабораторний біохімічний аналіз відібраних зразків рослинного і тваринного походження на вміст мінеральних елементів, токсичних важких металів зроблено методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії (спектрофотометр ААС-30). Екологічний моніторинг екосистем та агробіогеоценозів застосовується постійно починаючи з 2000 року по сьогодні у відповідності з етапами виконання НДДКР Державний реєстраційний номер: 0121U113933 від 18.11.2021 року.

Кореляційний аналіз проводився за непараметричним ранговим коефіцієнтом кореляції Спірмена (Correlations Spearman) з урахуванням тесту Шапіро-Уїлка (Shapiro-Wilk's W test). Кореляційна залежність вважалася статистично вірогідною за $p < 0.05$. Обробка статистичних даних проводилася в пакеті програм STATISTICA версії 10.0.

Згодовування продуктивним тваринам кормів з вмістом важких металів Cd, Pb вплинуло не лише на перехід їх з травного тракту в кров, молоко, але і у органічні відходи тваринництва. В умовах науково-господарського досліді силу кореляційної залежності між вмістом важких металів у кормах та органічних відходах встановлювали за допомогою одного з непараметричних коефіцієнтів кореляції, а саме рангового коефіцієнта кореляції Спірмена (Correlations Spearman), так як тест Шапіро-Уїлка (Shapiro-Wilk's W test), котрий вважається найпотужнішим щодо встановлення відповідності отриманих даних закону «нормального» розподілу (Гаусового), показав, що вміст Cd та Pb в кормах раціону, органічних відходах не підпорядковується закону нормального розподілу. Якщо використати коефіцієнт Пірсона в такій ситуації це може призвести, на нашу думку, до хибних висновків. Коефіцієнт кореляції Пірсона доцільніше застосовувати коли показники відповідають закону нормального розподілу. Результати кореляційного аналізу наведено на рисунках 1–2.

Коефіцієнт кореляції між концентрацією важких металів Cd і Pb в кормах та органічних відходах тварин в усіх проаналізованих випадках був позитивним і високим. У деяких випадках дуже високим від $r = 0,66$ до $r = 0,83$ (прямий високий ступінь взаємозв'язку). Найменшим на рівні $r = 0,66$ був кореляційний зв'язок між показниками у корів з силосно-сінажним типом годівлі як по концентрації Cd, так і Pb, у тварин з силосно-коренеплодним типом годівлі, але лише за вмістом Cd ($p < 0,05$). Самий високий коефіцієнт кореляції встановлено за вмістом Cd і Pb у корів з силосно-сінним типом годівлі $r = 0,83$ ($p < 0,05$). Дуже високий кореляційний зв'язок програма STATISTICA виділяє червоним кольором (рис. 2). Програма одночасно встановлює і статистичну значимість. Вона в усіх досліджених випадках становила $p < 0,05$ (рис. 2).

Щодо концентрації кадмію найслабшим кореляційний зв'язок встановлений у тварин з силосно-коренеплодним і силосно-сінажним типом годівлі $r = 0,66$ ($p < 0,05$), більш сильною кореляція була у корів з силосно-сінажно-концентратним – $r = 0,75$ ($p < 0,05$), дуже високою – з силосно-сінним типом годівлі $r = 0,83$ ($p < 0,05$) (рис. 2). За концентрацією свинцю найслабшим кореляційний зв'язок був встановлений у тварин з силосно-сінажним типом годівлі $r = 0,66$ ($p < 0,05$), більш сильною кореляція була у корів з силосно-коренеплодним $r = 0,71$ ($p < 0,05$) і силосно-сінажно-концентратним типом годівлі $r = 0,77$ ($p < 0,05$), дуже високою – у тварин з силосно-сінним типом годівлі $r = 0,83$ ($p < 0,05$) (рис. 2).

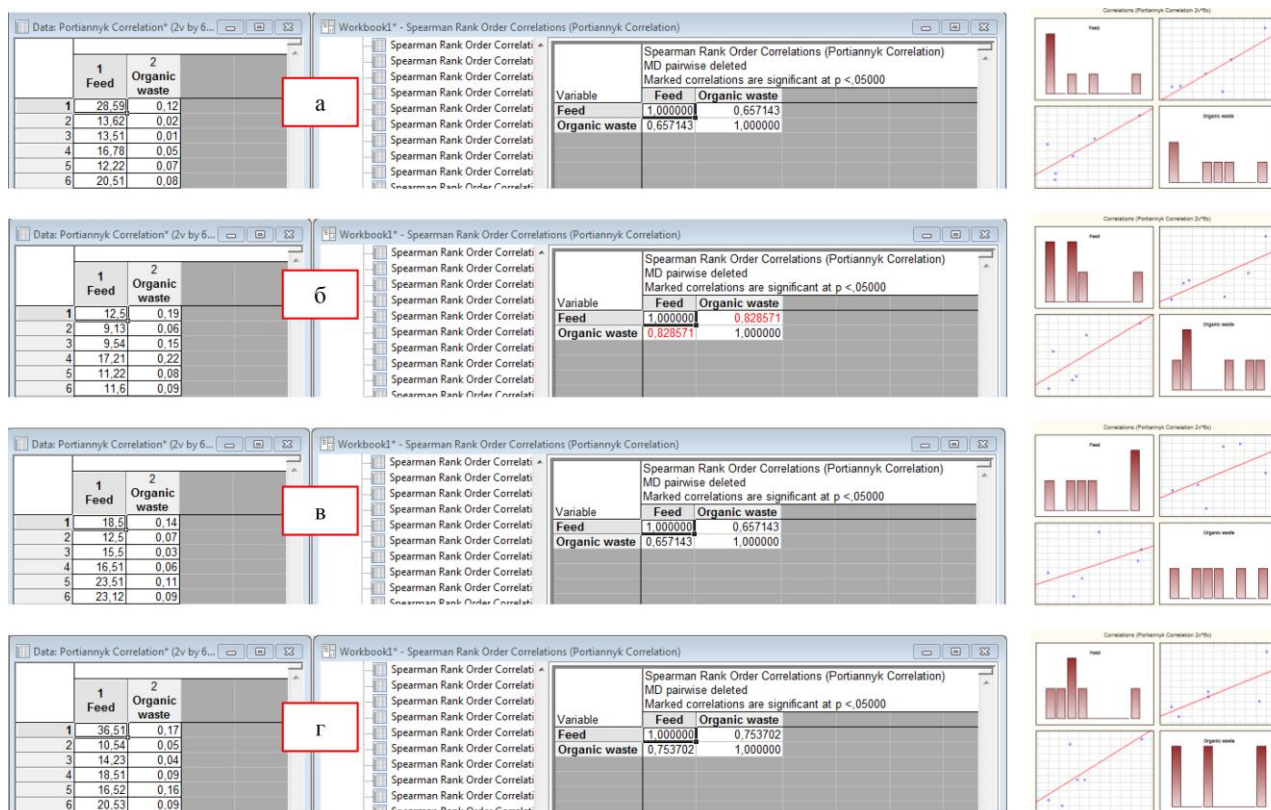


Рисунок 1 Записані у вікно програми показники концентрації Cd в кормах раціону та органічних відходах $n = 6$ і результат – коефіцієнт кореляції Спірмена між вмістом Cd в кормах раціону і органічних відходах.

Типи годівлі: а – силосно-коренеплодний; б – силосно-сінний;
в – силосно-сінажний; г – силосно-сінажно-концентратний

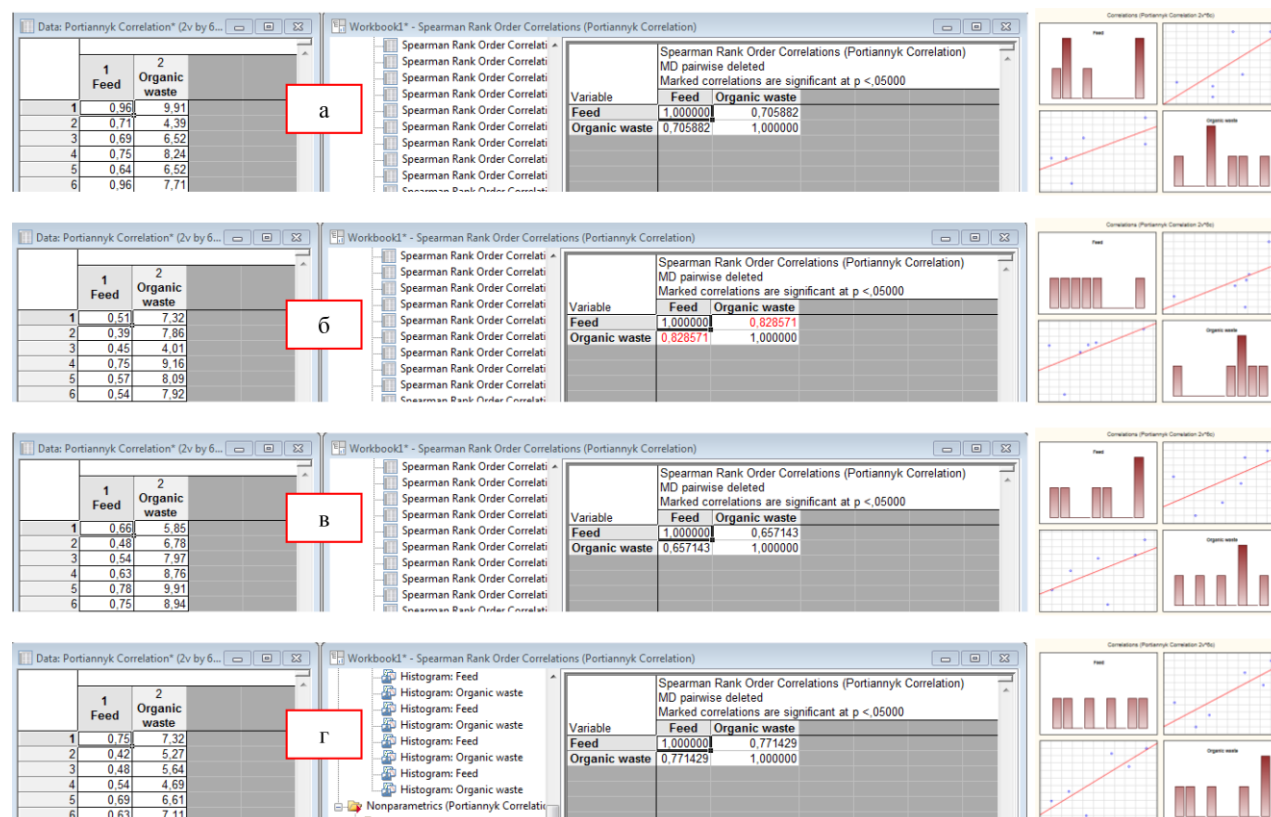


Рисунок 2 – Записані у вікно програми показники вмісту Pb в кормах раціону та органічних відходах $n = 6$ та результат – коефіцієнт кореляції Спірмена між вмістом Pb в кормах раціону і органічних відходах

Типи годівлі: а – силосно-коренеплодний; б – силосно-сінний;
в – силосно-сінажний; г – силосно-сінажно-концентратний

До складу раціонів тварин входили корми, котрі мали підвищений вміст небезпечних поллютантів:

– у корів з силосно-коренеплодним типом годівлі перевищення ГДК по кадмію становило у сіні злаково-бобовому у 5,7 рази, соломі пшеничній, силосі кукурудзяному у 2,7 рази, сінажі люцерновому – 3,4, буряку кормовому – 2,4 та дерті кукурудзяній у 4,1 рази відповідно, а по свинцю у 3,2, 2,4, 2,3, 2,5, 2,1, 3,2 рази відповідно;

– у корів з силосно-сінним типом годівлі перевищення ГДК по кадмію становило в соломі пшеничній у 2,5 рази, силосі кукурудзяному – 1,8, сінажі люцерновому – 1,9, буряку кормовому – 3,4, сіні люцерновому – 2,2 та дерті ячмінній у 2,3 рази відповідно, а по свинцю у 1,7, 1,3, 1,5, 2,5, 1,9, 1,8 рази відповідно;

– у корів з силосно-сінажним типом годівлі перевищення ГДК по кадмію становило в сіні злаково-бобовому у 3,7 рази, силосі кукурудзяному – 2,5, сінажі люцерновому – 3,1, сіні люцерновому – 3,3, дерті гороховій – 4,7 та дерті вівсяній у 4,6 рази відповідно, а по свинцю у 2,2, 1,6, 1,8, 2,1, 2,6, 2,5 рази відповідно;

– у корів з силосно-сінажно-концентратним типом годівлі перевищення ГДК по кадмію становило у сіні злаково-бобовому у 7,3 рази, силосі кукурудзяному – 2,1, сінажі люцерновому – 2,8, дерті кукурудзяній – 3,7, сіні люцерновому – 3,3 та дерті гороховій у 4,1 рази відповідно, а по свинцю у 2,5, 1,4, 1,6, 1,8, 2,3, 2,1 рази відповідно.

Отже, застосування рангового коефіцієнту кореляції Спірмена, дозволило розрахувати і достовірно встановити високу силу кореляційного зв'язку між важливими для проведеного дослідження показниками вмісту токсичних важких металів кадмію, свинцю у кормах раціону продуктивних тварин і їх органічних відходах за різних типів годівлі у дослідних господарствах.

Вирішенням проблеми забруднення довкілля токсичними важкими металами, особливо такими як Cd та Pb, котрі швидко переміщуються з ґрунту (табл. 1) через кореневу систему в рослини, а далі з кормом потрапляють в організм тварин, продукцію, а з продуктами харчування і в організм людини займаються вітчизняні і закордонні вчені [1–3, 7–8, 10, 19]. Посилене техногенне навантаження, дія небезпечних екологічних факторів, сьогодні і наслідки бойових дій роблять забруднення біосфери і її компонентів важкими металами не прогнозованим. Токсичні важкі метали виводяться з організму тварин з екскрементами, що знезаражуються у гноєсховищах певний час. Органічні відходи тваринництва вносяться у ґрунт як органічне добриво посилюючи як валову, так і фонову концентрацію поллютантів.

Підстилковий гній великої рогатої худоби один з найпоширеніших видів органічного добрива. Таким добривам належить значна роль в утворенні гумусу, рівень котрого у ґрунті постійно знижується. Гумус є енергетичною базою біопроцесів, що відбуваються у ґрунті, джерелом макро- і мікроелементів для рослин в тому числі важких металів, фізіологічно активних речовин, сорбентом забруднюючих

речовин токсичних металів, пестицидів ін. Фонова концентрація досліджуваних важких металів у ґрунтах всіх дослідних господарств знаходиться в межах гранично допустимих концентрацій, але при цьому було виявлено перевищення ГДК рухомих форм в середньому по Cd у 4,3...8,3 рази, Pb у 4,9...8,8 рази, Cu – 3,3...4,5 та Zn у 1,8...2 рази відповідно в першому дослідному господарстві, у 2 і 4 – спостерігалася схожа ситуація перевищення ГДК в середньому становило: по Cd – у 3,9...9 та 3,6...7,3 рази, Pb – у 4,8...9 та 4,7...8,2 рази, Cu – 3,2...5 та 1,9...4 рази, Zn – 1,8...2 та 1,7...1,9 рази відповідно, у 3-у господарстві у 3...8,6 рази по Cd, 4-9 рази – Pb, 2,6...4,7 рази – Cu та у 1,7...2,1 рази по Zn.

Тригером негативних змін в агробіогеоценозах аграрних підприємств, котрі розташовані навколо розвинених промислових центрів може бути порушення екологічно безпечних норм внесення у ґрунт органічних відходів тваринництва як органічного добрива. Екологічна небезпека в агроєкосистемах сільськогосподарських підприємств посилюється воєнним екоцидом внаслідок забруднення хімічними речовинами в тому числі важкими металами після мінувань та ракетних обстрілів.

Закордонні науковці [20] досліджували забруднення ґрунту і виявили п'ятдесят чотири небезпечних екотоксиканти. Вченими було відібрано 40 зразків ґрунту навколо п'яти печей з виробництва цегли. Для обробки отриманих даних використовували багатофакторну статистику. В результаті прийшли до висновку, що крім спалювання вугілля у печах, забруднення ґрунту здійснює ведення сільського господарства.

Вітчизняні науковці [19] зазначають важливість дослідження проблеми забруднення довкілля токсичними важкими металами, котрі здійснюють шкідливий вплив на різні види живих організмів. Дослідники підкреслюють концентрацію токсичних елементів як визначальний показник потенційного негативного впливу екотоксикантів.

Найбільш пріоритетними для проведення хіміко-токсикологічного аналізу, контролю за забрудненням територій науковці зазначають свинець, кадмій, ртуть, мідь, нікель, кобальт, цинк, котрі мають високу екотоксичність та міграційну здатність, що узгоджується з нашими дослідженнями [1–3, 7–9, 19, 21–22].

Поведінка екотоксикантів у різних компонентах біосфери обумовлена їх відповідною специфічністю та властивостями, особливо такими як токсичність, рухомість та акумуляція, комплексоутворення тощо. Вчені дослідивши кореляційний зв'язок між вмістом токсичних важких металів у ґрунтах екосистем під час вирішення задач математичного моделювання в екомоніторингу роблять висновки, що існує тісний зв'язок між акумуляцією поллютантів у ґрунтах за їх малою міграційною здатністю через наявність нерозчинних сполук, до складу котрих вони входять. Даний факт обумовлюється комплексними забрудненнями всіх компонентів біосфери, зокрема, техногенними речовинами хімічної природи (катіоногени, аніоногени).

Таблиця 1 – Вміст рухомих форм важких металів в ґрунтах сільськогосподарських угідь в залежності від відстані до джерела забруднення, мг/кг сухого ґрунту*, $M \pm SD$, $n = 10$

Утримання тварин за раціоном	Важкі метали, мг/кг (ГДК), рухомі форми	Відстань від джерела забруднення, км													
		3	6	9	12	15	18	21	25	28	32	35	38	42	45
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Силосно-сінажного типу	Cd	B(3)	1,92 ±0,12	1,76 ±0,03	1,64 ±0,11	1,48 ±0,15	1,30 ±0,16	0,97 ±0,09	0,92 ±0,16	Фоновий вміст в межах ГДК					
		P(0,07)	0,60 ±0,07	0,49 ±0,11	0,44 ±0,04	0,39 ±0,06	0,34 ±0,15	0,27 ±0,12	0,21 ±0,08	Перевищення ГДК в середньому – у 8,6...3 рази					
	Pb	B(30)	27,62 ±1,61	27,01 ±1,44	26,03 ±1,33	24,98 ±1,84	23,07 ±1,21	20,56 ±1,17	18,97 ±1,30	Фоновий вміст в межах ГДК					
		P(2,0)	18,14 ±1,34	16,15 ±1,21	14,12 ±1,07	12,03 ±0,97	11,07 ±0,85	9,64 ±1,44	8,05 ±1,63	Перевищення ГДК в середньому – у 9...4 рази					
	Cu	B(100)	31,56 ±1,24	30,42 ±1,40	28,64 ±1,08	27,09 ±1,32	25,52 ±1,97	23,06 ±1,46	21,77 ±1,85	Фоновий вміст в межах ГДК					
		P(3,0)	14,15 ±1,02	13,83 ±1,21	12,68 ±1,07	11,04 ±1,02	10,92 ±0,97	9,73 ±0,94	7,70 ±1,12	Перевищення ГДК в середньому – у 4,7...2,6 рази					
	Zn	B(300)	97,62 ±2,65	93,51 ±2,31	87,64 ±1,98	80,92 ±2,47	79,83 ±2,04	72,61 ±2,02	66,91 ±1,68	Фоновий вміст в межах ГДК					
		P(23)	47,51 ±2,57	46,04 ±1,62	44,01 ±2,34	42,91 ±1,27	41,50 ±1,36	39,27 ±2,17	38,63 ±1,22	Перевищення ГДК в середньому – у 2,1...1,7 рази					
Силосно-коренеплодного типу	Cd	B(3)	1,80 ±0,04	1,74 ±0,06	1,62 ±0,08	1,57 ±0,07	1,21 ±0,03	0,92 ±0,03	0,98 ±0,10	1,27 ±0,12					
		P(0,07)	0,58 ±0,07	0,56 ±0,04	0,50 ±0,10	0,43 ±0,03	0,37 ±0,07	0,30 ±0,08	0,34 ±0,02	0,37 ±0,05					
	Pb	B(30)	26,21 ±1,16	25,71 ±1,08	23,51 ±1,42	21,89 ±1,31	19,51 ±1,60	18,22 ±1,51	19,84 ±1,70	22,09 ±0,94					
		P(2,0)	17,52 ±0,96	16,05 ±1,12	14,62 ±1,57	11,41 ±1,16	11,11 ±1,03	9,76 ±1,09	10,64 ±0,87	11,92 ±1,18					
	Cu	B(100)	28,92 ±1,21	26,90 ±1,30	24,70 ±1,42	23,08 ±1,09	22,11 ±1,01	18,55 ±1,15	20,01 ±1,19	21,60 ±1,10					
		P(3,0)	13,54 ±1,16	12,64 ±1,03	11,47 ±1,07	11,02 ±0,94	10,17 ±0,87	9,84 ±1,09	10,93 ±0,92	11,07 ±1,07					
	Zn	B(300)	95,11 ±2,01	92,06 ±1,61	85,65 ±2,11	80,61 ±2,16	74,44 ±1,72	70,22 ±1,65	73,00 ±2,09	73,92 ±2,50					
		P(23)	46,92 ±1,41	46,01 ±2,52	45,75 ±1,48	44,03 ±1,46	42,11 ±2,34	41,24 ±1,26	42,08 ±1,19	43,11 ±1,28					
Силосно-сінажно-концентратного типу	Cd	B(3)	1,60 ±0,03	1,52 ±0,01	1,40 ±0,07	1,21 ±0,04	1,18 ±0,09	1,01 ±0,05	0,97 ±0,07	1,15 ±0,04					
		P(0,07)	0,51 ±0,08	0,45 ±0,05	0,39 ±0,02	0,31 ±0,06	0,28 ±0,10	0,26 ±0,07	0,25 ±0,03	0,30 ±0,11					
	Pb	B(30)	25,38 ±1,17	24,7 ±1,20	23,07 ±1,10	22,01 ±1,09	21,92 ±1,27	20,30 ±1,22	20,02 ±1,35	20,87 ±0,98					
		P(2,0)	16,34 ±1,34	15,07 ±0,98	13,54 ±1,10	11,21 ±1,15	10,27 ±1,44	9,56 ±1,11	9,40 ±0,92	9,79 ±1,22					
	Cu	B(100)	26,45 ±1,19	25,01 ±1,10	24,01 ±1,18	23,11 ±1,22	22,07 ±1,21	20,06 ±1,04	19,90 ±1,30	20,98 ±1,09					
		P(3,0)	12,03 ±1,23	11,64 ±1,14	10,02 ±0,98	9,64 ±1,08	8,37 ±1,23	6,44 ±1,14	5,80 ±1,34	7,52 ±1,05					
	Zn	B(300)	87,61 ±2,32	80,04 ±2,19	70,01 ±2,22	62,58 ±2,12	54,44 ±1,94	46,03 ±1,72	40,09 ±1,34	42,22 ±2,06					
		P(23)	43,04 ±1,15	42,84 ±2,07	42,02 ±1,98	41,58 ±2,01	40,29 ±1,63	37,03 ±2,07	38,17 ±1,08	39,57 ±2,41					
Силосно-сінного типу	Cd P>9-3,9	B(3)	1,76 ±0,09	1,62 ±0,07	1,54 ±0,01	1,46 ±0,06	1,33 ±0,04	1,28 ±0,09	1,22 ±0,03	1,42 ±0,07					
		P(0,07)	0,55 ±0,07	0,50 ±0,11	0,46 ±0,09	0,41 ±0,07	0,34 ±0,03	0,32 ±0,11	0,27 ±0,09	0,32 ±0,06					
	Pb P>9-4,8	B(30)	26,01 ±1,16	25,98 ±1,21	24,06 ±1,10	23,52 ±1,30	22,00 ±1,32	21,97 ±1,40	20,33 ±1,18	19,89 ±1,33					
		P(2,0)	16,97 ±0,72	14,92 ±1,17	13,07 ±1,14	11,04 ±0,93	10,89 ±1,28	9,81 ±1,36	9,54 ±0,94	11,01 ±1,42					
	Cu P>5-3,2	B(100)	28,01 ±1,19	27,63 ±1,35	25,12 ±1,42	24,32 ±1,11	21,74 ±1,23	20,92 ±1,27	19,01 ±1,08	21,60 ±1,52					
		P(3,0)	12,84 ±0,93	11,66 ±0,97	11,04 ±1,04	10,83 ±1,05	10,31 ±0,94	10,01 ±0,89	9,52 ±1,17	10,11 ±1,21					
	Zn P>2-1,8	B(300)	93,90 ±1,97	90,01 ±1,84	83,92 ±1,76	76,04 ±1,20	70,11 ±1,65	68,07 ±1,69	65,00 ±1,81	71,71 ±1,92					
		P(23)	45,72 ±1,09	45,41 ±2,11	44,61 ±1,45	44,11 ±2,09	43,12 ±1,63	42,51 ±2,01	39,82 ±1,52	40,64 ±1,34					

*– проби відбирались на глибині 25 см, ГДК взято за даними [23]

Встановивши кореляцію і побудувавши відповідні рівняння регресії науковці за допомогою математичної моделі можуть прогнозувати відповідні екологічні зміни і відповідно оцінювати екологічні ризики. Дослідження вище зазначених вчених тісно пов'язані між собою і мають подібну методологію. Зроблений нами аналіз органічних відходів тваринництва показує вміст у них певних концентрацій кадмію та свинцю. Органічні відходи потрапивши у ґрунт як органічні добрива, збільшують його родючість, проте одночасно відбувається акумуляція поллютантів. Останні можуть утворювати не лише валові, а й рухомі форми. В залежності від рН ґрунту інших факторів, токсичні елементи можуть мігрувати в рослини, які є кормом для тварин. Незалежно від виду ведення землеробства традиційного чи альтернативного органічно-біологічного полютанти в результаті потрапляють у продукти харчування людини, далі в організм викликаючи в ньому приховані негативні зміни в загальному обміні речовин [19]. У своєму дослідженні ми так само використали кореляційний аналіз з обробкою статистичних даних більш сучасними програмними засобами (програма STATISTICA версії 10.0), котрі широко застосовуються сьогодні як вітчизняними, так і закордонними вченими. Наприклад, вчені [24] застосовували кореляційний аналіз Спірмена вивчаючи концентрації озону, SO₂, оксиду вуглецю, твердих частинок і ін. Інші вчені [25] досліджували концентрації важких металів при спалюванні промислових небезпечних відходів тощо. Необхідно зазначити, що використання для аналізу програмного пакету Statistic Microsoft Excel є не менш надійним методом обробки статистичних даних отриманих результатів досліджень.

Тож складність процесів, котрі протікають в екосистемах, ефективний екомоніторинг потребують використання перевірених в наукових дослідженнях більш сучасних методів моделювання екологічної ситуації з застосуванням відповідних комп'ютерних програм. Моделювання має перевагу в тому, що дозволяє простими і не дорогими методами аналізувати стан екосистем, передбачити характер зміни внаслідок дії відповідних факторів. Наприклад, забруднення токсичними важкими металами після внесення у ґрунт добрив з органічних відходів тваринництва. Сама важлива вимога до таких екологічних моделей це точність і достатня узагальненість. Точність моделей залежить від кількості елементів вибраних для її побудови, а також параметрів самої системи. Якщо включити до моделі велику кількість компонентів це ускладнить аналіз. Буде створюватися «шум». Якщо значно зменшити кількість елементів, звівши їх до мінімуму – модель стане далекою від реальності. Існують вербальні, графічні, математичні і інші види моделей. Нами, як і іншими вченими [4, 24–25], було побудовано математичні моделі. В їх основі розрахунок кореляційної залежності між показниками, що досліджуються. Одночасно було побудовано і відповідні рівняння регресії. В наукових дослідженнях досить часто виникає

потреба пошуку взаємозв'язку між різними показниками досліджуваних груп. Нами проаналізовано концентрацію важких металів Cd та Pb у кормах тварин з різними типами годівлі та їх органічними відходами. При вирішенні завдань такого типу застосовують різні види кореляційного аналізу. За допомогою кореляційного аналізу можна оцінити напрямок взаємозв'язку між двома показниками. Прямий він чи зворотній і виразити кількісно за допомогою коефіцієнта кореляції. Зв'язок буде тим сильніший між показниками, чим ближче коефіцієнт кореляції наблизатиметься до одиниці за модулем. Встановлена нами за результатами експерименту кореляційна залежність між кадмієм та свинцем у кормах раціону і органічних відходах тварин важлива для проведення екологічного моніторингу з оцінкою ризику забруднення ґрунту агроєкосистем. Доповнюється вже існуючий набір інструментарію фахівців-екологів, технологів з захисту навколишнього природного середовища, зооінженерів, технологів аграрного виробництва інших спеціалістів для збереження довкілля, оскільки моніторинговий відбір зразків ґрунту їх лабораторний аналіз достатньо складний, потребує збільшення матеріальних і трудових затрат.

До екомоніторингу забруднення ґрунтів важкими металами необхідно підходити комплексно. Здійснення відбору зразків ґрунту їх лабораторний хімічний аналіз встановить з дуже високою точністю концентрацію валових і рухомих форм поллютантів. В той час як кореляційний аналіз, за відомим лабораторним аналізом кормів, котрий здійснюється регулярно в агрогосподарствах, так як мінеральний склад кормів раціону впливає на здоров'я і молочну продуктивність тварин, дозволить з високою точністю прогнозувати концентрацію токсичних важких металів в органічних відходах. З урахуванням норми внесення у ґрунт органічного добрива прогнозувати акумуляцію екологічних токсикантів важких металів, оцінити екологічні ризики вирощування екобезпечних кормів для тварин чи продуктів харчування для людини. У роботі спеціалістів аграрного виробництва в тому числі фахівців-екологів головним є прогноз розвитку ситуації, необхідно не допустити повторного забруднення агроєкосистем, виникнення крайнього загрозливого (катастрофічного) стану. Встановлена в ході досліджень висока $r = 0,66 \dots 0,75$, дуже висока $r = 0,83$ (кадмій) ($p < 0,05$) і висока $r = 0,66 \dots 0,77$, дуже висока $r = 0,83$ (свинець) ($p < 0,05$) кореляційна залежність між вмістом поллютантів у кормах і органічних відходах дозволяє фахівцям ефективно діяти в умовах виробництва з впевненістю застосовувати метод екомоніторингу та прогнозувати розвиток екологічної ситуації.

Метод кореляційного аналізу широко та ефективно застосовується в практиці дослідників різних країн світу. Використовується у різних галузях народного господарства, не лише у сільському виробництві. Вчені [26] провели експеримент щодо впливу козячого молока, що

збагачене олігосахаридами, на структури мікроорганізмів у товстому кишківнику мишей. Використавши метод кореляційного аналізу Спірмена, науковці дослідили силу кореляції між мікробіотою та коротколанцюговими жирними кислотами. Пропіонова, ізомасляна і валеріанова кислоти позитивно корелюють з певними мікроорганізмами. Доводять, що козяче молоко корисне для поліпшення середовища товстого кишківника. Ранговий коефіцієнт кореляції Спірмена ефективно застосували в аналізі показників і дослідники [27]. Вони дослідили взаємозв'язок між дозою радіації природного іонізуючого випромінювання і онкозахворюваністю людей в країні. Вчені взяли дані про потужність дози радіації зі ста семидесяти одного пункту спостереження у ста тринадцяти адміністративних одиниць країни за 10 років з 2007 по 2016 роки. Відносна кількість випадків онкозахворювань для цього аналізу була різницею в кількості хворих на рак на сто тисяч людей щорічно в адміністративних одиницях з 5 найвищими і 5 найнижчими показниками природної гамма-дозы щороку за той самий період. Коефіцієнт рангової кореляції Спірмена між двома показниками був отриманий за допомогою R. В результаті коефіцієнт рангової кореляції Спірмена перевищував 0,05. Кореляція між двома змінними не була статистично значимою.

Таким чином, наукова міжнародна практика, показує, що за допомогою рангового непараметричного коефіцієнта кореляції Спірмена може бути встановлена як висока сила кореляційного зв'язку між досліджуваними показниками як у наших дослідженнях та дослідженнях [26] і навпаки сила кореляційного зв'язку може бути низькою, як і статистична вірогідність [27].

Методологія оцінки екологічного ризику та вибір оптимальних шляхів усунення або зменшення ризику у даній конкретній ситуації складається з 3-х взаємопов'язаних елементів:

1. оцінка ризику;
2. управління ризиком;
3. інформування про ризик.

Їх сукупність дозволяє не лише виявити існуючі проблеми та розробити шляхи вирішення, але й створити умови для практичної реалізації відповідних рішень. З урахуванням високої та дуже високої кореляційної залежності досліджуваних показників екоризик забруднення ґрунту Cd, Pb є так само високим. Висока вірогідність того, що це може привести до погіршення якості ґрунту, деградації флори, фауни ґрунтових екосистем, зменшення видового біорізноманіття, порушення біологічно-геохімічних циклів, процесів саморегуляції, екорівноваги, зниження адаптаційних можливостей агробіогеоценозів внаслідок

ненормованого внесення органічних добрив, що містять токсичні хімічні елементи. Погоджуємося з науковцями з Португалії [28], які звертають увагу на лімітуючий фактор, концентрацію поліютантів важких металів, у застосуванні органічних відходів на ґрунтах сільськогосподарських угідь. Вчені відбирали по дев'ять зразків різних органічних відходів осаду з муніципальних стічних вод, компосту тощо. Те саме було зроблено й нами. Дослідники [28] наголошують, що застосування органічних відходів є важливим фактором дотримання Директиви Ради 1999/31/ЄС про захоронення відходів (Landfill Directive) з дотриманням політики зменшення утворення відходів в країнах Європи та одночасним стратегічним завданням збільшення концентрації органо-мінеральних речовин у ґрунті, котра може бути дуже низькою. Ксенобіотики, важкі метали, не розкладаються під час зберігання та знезаражування гною у гноєсховищах, утворенні компостів [29].

Отже, багато комп'ютерних програм доступні сьогодні на ринку в тому числі як використана нами для кореляційного аналізу STATISTICA версії 10.0 доводить свою ефективність. З урахуванням попередньої перевірки отриманих показників лабораторного аналізу кормів для тварин та органічних відходів за тестом Шапіро-Уїлка доцільно застосовувати непараметричний ранговий коефіцієнт кореляції Спірмена для встановлення сили кореляції і прогнозування розвитку екологічного стану агроєкосистем, оцінки екологічного ризику.

Висновки.

Високу й дуже високу кореляційну залежність між вмістом важких металів Cd та Pb в кормах і органічних відходах дійних корів встановлено в результаті статистичної обробки даних з функцією аналізу непараметричної рангової кореляції Спірмена, що значно полегшує спеціалістам-екологам здійснювати екологічний моніторинг, прогнозувати забруднення ґрунту агроєкосистем, оцінювати екологічний ризик в тому числі щодо ведення екологічно безпечного органічно-біологічного землеробства. Забезпечить вчасне застосування агровиробниками заходів зі зниження концентрації поліютантів в органічних відходах, знизить забруднення ґрунту токсичними важкими металами, сприятиме дотриманню Директив, Регламентів ЄС щодо стану ґрунтів і поводження з відходами.

Подальші дослідження спрямовані на кореляційний та регресійний аналіз, але за іншими показниками важливими у виробничій практиці щодо забезпечення екологічної безпеки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ковальова С. П. (2025). Вміст Pb і Cd в кормах та їх перехід у молоко за різної продуктивності корів. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Тваринництво»*. 2025. № 1(60). С. 26–32.
2. Найдюнова О. О. Екологічні проблеми України: наслідки війни: веблібрафічний покажчик. Кропивницький: ТЧНТУ, 2023. 19 с.

3. Кушнір С. О., Оніпко А. Д. Екологічна ситуація в Україні: аналіз проблем та фінансування напрямків їх подолання. *Економічний простір*. 2018. № 136. С. 191–201.
4. Heavy metal contamination risk assessment and correlation analysis of heavy metal contents in soil and crops / M. Xiang et al. *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 278. Art. 116911. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116911.
5. Chromium as a Risk Factor for Breast Cancer: A Meta-Analysis / G. Batoryova et al. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*. 2022. Vol. 23(12). P. 3993–4003. DOI: 10.31557/APJCP.2022.23.12.3993.
6. Wang Y., Duan X., Wang L. Spatial distribution and source analysis of heavy metals in soils influenced by industrial enterprise distribution: Case study in Jiangsu Province. *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 710. Art. 134953. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134953.
7. Portiannik S., Mamenko O. Removal of toxic metals from the body of cows by using antidote substances, with its impact on milk productivity and environmental safety of agroecosystems around the industrial city in Ukraine. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2021. Vol. 4(4). P. 154–177. DOI: 10.33002/nr2581.6853.040411.
8. Вплив кадмієвого навантаження на систему антиоксидантного захисту організму бугайців / Гутий Б.В. та ін. *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія, екологія*. 2016. Т. 24, № 1. С. 96–102. DOI: 10.15421/011611.
9. Savchuk I., Skydan O., Stepanenko V. et al. (2021). Safety of livestock products of bulls on various diets during fattening in the conditions of radioactive contamination. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. № 12 (1). P. 86 – 91. DOI: 10.15421/022113.
10. Mamenko O., Portiannik S. Rank non-parametric correlation analysis of indicators of heavy metal transition from blood to cow's milk to assess its environmental safety. *Scientific Horizons*. 2021. Vol. 24(5). P. 35–45. DOI: 10.48077/scihor.24(5).2021.35-45.
11. Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales / F. A. Nicholson, B. J. Chambers, J. R. Williams, R. J. Unwin. *Bioresource Technology*. 1999. Vol. 70, Issue 1. P. 23–31. DOI: 10.1016/S0960-8524(99)00017-6.
12. Co-occurrence correlations of heavy metals in sediments revealed using network analysis / L. Liu, Z. Wang, F. Ju, T. Zhang. *Chemosphere*. 2015. Vol. 119. P. 1305–1313. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.01.068.
13. Rudy M. The analysis of correlations between the age and the level of bioaccumulation of heavy metals in tissues and the chemical composition of sheep meat from the region in SE Poland. *Food and Chemical Toxicology*. 2009. Vol. 47, Issue 6. P. 1117–1122. DOI: 10.1016/j.fct.2009.01.035.
14. Savchenko Ju., Savchuk I., Savchenko M. Density of Pb and Cd in pork at use in rations of different grain mixtures. *Bulletin of Agrarian Science*. 2016. Vol. 94, No. 5. Pp. 21–24.
15. Risk assessment of potentially toxic element pollution in soils and rice (*Oryza sativa*) in a typical area of the Yangtze River Delta / X. Hang et al. *Environmental Pollution*. 2009. Vol. 157, Issues 8–9. P. 2542–2549. DOI: 10.1016/j.envpol.2009.03.002.
16. Cadmium bioavailability in surface soils receiving long-term applications of inorganic fertilizers and pig manure / L. Wu et al. *Geoderma*. 2012. Vol. 173–174. P. 224–230. DOI: 10.1016/j.geoderma.2011.12.003.
17. Multifaceted environmental risk assessment of beryllium, cadmium, nickel, and cobalt for soil contamination through PM10 on the city scale / H. Zhang et al. *Ecological Indicators*. 2024. Vol. 159. Art. 111756. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.111756.
18. Обов'язковий мінімальний перелік досліджень сировини, продукції тваринного та рослинного походження, комбікормової сировини, комбікормів, вітамінних препаратів та ін. які слід проводити в державних лабораторіях ветеринарної медицини і за результатами яких видається ветеринарне свідоцтво (Ф-2). Київ: Державний департамент ветеринарної медицини, 1998. 32 с.
19. Savchenko Ju., Savchuk I., Koval'ova S. Concentration of 137 Cs and heavy metals in the meat of ducks grown in different areas of radioactive contamination. *Bulletin of Agricultural Science*. 2017. Vol. 95, No. 3. P. 31–38. DOI: 10.31073/agroviznyk201703-05.
20. Distribution, contamination status and source of trace elements in the soil around brick kilns / S. Kumar et al. *Chemosphere*. 2021. Vol. 263. Art. 127882. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127882.
21. Козуля Т. В., Глушкова Л. В., Штігельман З. В. Визначення кореляцій між вмістом важких металів у ґрунтах різних екосистем при вирішенні задач математичного моделювання в екологічному моніторингу. *Radio electronics and informatics*. 2004. Vol. 4, Issue 29. P. 159–164.
22. Mamenko O. M., Portiannik S. V. Features of heavy metal excretion in dairy cows in agroecosystems around an industrial city and the production of environmentally safe milk. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2021. No 11. P. 29–43. DOI: 10.15421/2021_207.
23. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин» від 15.12.2021 р. № 1325. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1325-2021-%D0%BF#Text> (дата звернення 10.03.2025).
24. Temporospatial variations and Spearman correlation analysis of ozone concentrations to nitrogen dioxide, sulfur dioxide, particulate matters and carbon monoxide in ambient air, China / Z. Wang et al. *Atmospheric Pollution Research*. 2019. Vol. 10, Issue 4. P. 1203–1210. DOI: 10.1016/j.apr.2019.02.003.
25. Mineral phase transition characteristics and its effects on the stabilization of heavy metals in industrial hazardous wastes incineration (IHWI) fly ash via microwave-assisted hydrothermal treatment / J. Zhang et al. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 877. Art. 162842. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162842.
26. Effects of goat milk enriched with oligosaccharides on microbiota structures, and correlation between microbiota and short-chain fatty acids in the large intestine of the mouse / Y. Han et al. *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol.104, Issue 3. P. 2773–2786. DOI: 10.3168/jds.2020.19510.
27. Joo H. Y., Kim J. W., & Moon J. H. Use of big data analysis to investigate the relationship between natural radiation dose rates and cancer incidences in Republic of Korea. *Nuclear Engineering and Technology*. 2020. Vol. 52, Issue 8. P. 1798–1806. DOI: 10.1016/j.net.2020.01.015.
28. Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors / P. Alvarenga et al. *Waste Management*. 2015. Vol. 40. P. 44–52. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.01.027.
29. Heavy metal concentrations and arsenic speciation in animal manure composts in China / X. Yang et al. *Waste Management*. 2017. Vol. 64. P. 333–339. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.03.015.

Portiannik S., Mamenko O., Kondratenko O.

CORRELATION ANALYSIS OF HEAVY METAL CONTENT IN ANIMAL FEED AND ORGANIC WASTE WITH ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL RISK OF CONTAMINATION OF AGROECOSYSTEMS BY POLLUTANTS

Ecotoxins heavy metals pose a significant threat to the environment in different countries of the world and Ukraine. After the end of hostilities, the ecological situation in agroecosystems will be more complex. The method of correlation analysis is one of the statistical data processing methods, which, when properly applied, allows you to quickly establish the strength of the relationship between indicators and its statistical probability. Assessment of environmental risk using the results of laboratory analysis of feed for productive cows and their organic waste for the content of heavy metals Cd, Pb obtained in scientific experiments is of great importance. These research methods are used in the practice of scientists from the European Union, the USA, and China. The experiments were conducted on dairy cows. Animal feeding by different types. The diet contained feed with an excess of pollutants. The high ecotoxicity of Cd, Pb affected their migration from feed to products, organic waste. The aim of the research is to analyze the correlation between the content of cadmium and lead in animal feed and their organic waste with an assessment of the risk of soil contamination by pollutants, after the use of organic waste as an organic fertilizer. The STATISTICA program version 10.0, the Shapiro-Wilk test

was used to check the compliance of the obtained data of laboratory analyses of feed and organic waste for the content of heavy metals with the law of “normal” distribution. The necessary non-parametric Spearman rank correlation coefficient was selected for calculation. Statistical analysis showed a high $r = 0.66 \dots 0.75$ (cadmium) ($p < 0.05$), $r = 0.66 \dots 0.77$ (lead) ($p < 0.05$), very high $r = 0.83$ (cadmium) ($p < 0.05$), $r = 0.83$ (lead) ($p < 0.05$) correlation between the concentration of toxicants in feed and organic waste, which allows environmental specialists to act quickly and effectively in production conditions, conduct environmental monitoring, predict the ecological situation of agrobiogeocenoses, and assess environmental risks, including those related to environmentally safe organic farming. Further research – correlation analysis for other important indicators of environmental safety in production practice.

Key words: ecotoxins, agrobiogeocenosis, pollution hazard, productive animals, environment, ecological safety, environmental protection technologies.

REFERENCES

1. Kovalova, S. P. (2025). Vmist Pb i Cd v kormakh ta yikh perekhid u moloko za riznoi produktyvnosti koriv [The content of Pb and Cd in feed and their transfer to milk at different productivity of cows]. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. Series "Livestock"*, 1(60), 26–32. [in Ukrainian]
2. Naydionova, O. O. (2023). *Ekologichni problemy Ukrainy: naslidky viyny: vebliohrafichnyy pokazhchyk [Ecological problems of Ukraine: consequences of the war: webliographic index]*. Kropyvnyts'kyi, TSNTU. [in Ukrainian]
3. Kushnir, S. O., & Onipko, A. D. (2018). Ekologichna sytuatsiya v Ukraini: analiz problem ta finansuvannya napryamkiv yikh podolannya [Environmental situation in Ukraine: analysis of problems and financing directions for overcoming them]. *Ekonomichnyy prostrir*, 136, 191–201. [in Ukrainian]
4. Xiang, M., Li, Y., Yang, J., Lei, K., Li, Y., Li, F., Zheng, D., Fang, X., & Cao, Y. (2021). Heavy metal contamination risk assessment and correlation analysis of heavy metal contents in soil and crops. *Environmental Pollution*, 278, 116911. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116911.
5. Batyrova, G., Kononets, V., Amanzholkyzy, A., Tlegenova, Z., & Umarova, G. (2022). Chromium as a Risk Factor for Breast Cancer: A Meta-Analysis. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, 23(12), 3993–4003. DOI: 10.31557/APJCP.2022.23.12.3993.
6. Wang, Y., Duan, X., & Wang, L. (2020). Spatial distribution and source analysis of heavy metals in soils influenced by industrial enterprise distribution: Case study in Jiangsu Province. *Science of The Total Environment*, 710, 134953. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134953
7. Portiannyyk, S., & Mamenko, O. (2021). Removal of toxic metals from the body of cows by using antidote substances, with its impact on milk productivity and environmental safety of agroecosystems around the industrial city in Ukraine. *Grassroots Journal of Natural Resources*, 4(4): 154–177. DOI: 10.33002/nr2581.6853.040411.
8. Gutyy, B., Mursjka, S., Hufrij, D., Hariv, I., Levkivska, N., Nazaruk, N., Haydyuk, M., Priyma, O., Bilyk, O., & Guta, Z. (2016). Vplyv kadmievoho navantazhennia na systemu antyoksydantnoho zachystu orhanizmu buhaisiv [Influence of cadmium loading on the state of the antioxidant system in the organism of bulls]. *Visnyk of Dnipropetrovsk University. Biology, ecology*, 24(1), 96–102. DOI: 10.15421/011611. [in Ukrainian]
9. Savchuk, I., Skydan, O., Stepanenko, V., Kryvyi, M., & Kovalova, S. (2021). Safety of livestock products of bulls on various diets during fattening in the conditions of radioactive contamination. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 12(1), 86–91. DOI: 10.15421/022113.
10. Mamenko, O., & Portiannyyk, S. (2021). Rank non-parametric correlation analysis of indicators of heavy metal transition from blood to cow's milk to assess its environmental safety. *Scientific Horizons*, 24(5), 35–45. DOI: 10.48077/scihor.24(5).2021.35–45.
11. Nicholson, F. A., Chambers, B. J., Williams, J. R., & Unwin, R. J. (1999). Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales. *Bioresource Technology*, 70(1), 23–31. DOI: 10.1016/S0960-8524(99)00017-6.
12. Liu, L., Wang, Z., Ju, F., & Zhang, T. (2015). Co-occurrence correlations of heavy metals in sediments revealed using network analysis. *Chemosphere*, 119, 1305–1313. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.01.068
13. Rudy, M. (2009). The analysis of correlations between the age and the level of bioaccumulation of heavy metals in tissues and the chemical composition of sheep meat from the region in SE Poland. *Food and Chemical Toxicology*, 47(6), 1117–1122. DOI: 10.1016/j.fct.2009.01.035.
14. Savchenko, Ju., Savchuk, I., & Savchenko, M. (2016). Density of Pb and Cd in pork at use in rations of different grain mixtures. *Bulletin of Agrarian Science*, 94(5), 21–24.
15. Hang, X., Wang, H., Zhou, J., Ma, C., Du, C., & Chen, X. (2009). Risk assessment of potentially toxic element pollution in soils and rice (*Oryza sativa*) in a typical area of the Yangtze River Delta. *Environmental Pollution*, 157(8–9), 2542–2549. DOI: 10.1016/j.envpol.2009.03.002.
16. Wu, L., Tan, C., Liu, L., Zhu, P., Peng, C., Luo, Y., & Christie, P. (2012). Cadmium bioavailability in surface soils receiving long-term applications of inorganic fertilizers and pig manure. *Geoderma*, 173–174, 224–230. DOI: 10.1016/j.geoderma.2011.12.003.
17. Zhang, H., Du, P., Yuan, B., Chen, J., Zhang, Y., Cai, L., Yang, Y., Wei, Y., Ma, S., & Zhao, B. (2024). Multifaceted environmental risk assessment of beryllium, cadmium, nickel, and cobalt for soil contamination through PM10 on the city scale. *Ecological Indicators*, 159, 111756. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.111756.
18. State Department of Veterinary Medicine. (1998). *Oboviazkovyi minimalnyi perelik doslidzen syrovyny, produktsii tvarynnoho ta roslynnoho pokhodzhennia, kombikormovoi syrovyny, kombikormiv, vitaminnykh preparativ ta in. yaki slid provodyty v derzhavnykh laboratoriiakh veterynarnoi medytyny i za rezultatsy yakykh vydaetsia veterynarne svidostvo (F-2) [Mandatory minimum list of studies of raw materials, products of animal and plant origin, feed raw materials, feed, vitamin preparations, etc. which should be conducted in state laboratories of veterinary medicine and based on the results of which a veterinary certificate (F-2) is issued]*. Kyiv.
19. Savchenko, Ju., Savchuk, I., & Kovalova, S. (2017). Concentration of 137 Cs and heavy metals in the meat of ducks grown in different areas of radioactive contamination. *Bulletin of Agricultural Science*, 95(3), 31–38. DOI: 10.31073/agrovisnyk201703-05.
20. Kumar, S., Zhao, M., Zhang, H., Rahman, M. A., Luo, C., & Rahman, M. M. (2021). Distribution, contamination status and source of trace elements in the soil around brick kilns. *Chemosphere*, 263, 127882. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127882.
21. Kozulya, T. V., Glushkova, L. V., & Shtitelman, Z. V. (2004). [Vyznachennia koreliatsii mizh vmistom vazhkykh metaliv u hruntakh riznykh ekosystem pry vyreshenni zadach matematychnoho modeliuvannia v ekolohichnomu monitorynhu] Determination of correlations between the content of heavy metals in soils of different ecosystems when solving problems of mathematical modeling in ecological monitoring. *Radio electronics and informatics*, 4(29), 159–164. [in Ukrainian]
22. Mamenko, O. M., & Portiannyyk, S. V. (2021). Features of heavy metal excretion in dairy cows in agroecosystems around an industrial city and the production of environmentally safe milk. *Ukrainian Journal of Ecology*, 11, 29–43. DOI: 10.15421/2021_207.
23. *Pro zatverdzhennia normatyviv hranychno dopustymykh kontsentratsii nebezpechnykh rechovyn u gruntakh, a takozh pereliku takykh rechovyn [On approval of standards for maximum permissible concentrations of hazardous substances in soils, as well as a list of such substances]*. 1325 Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine. (2021). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1325-2021-%D0%BF#Text>. [in Ukrainian].
24. Wang, Z., Lv, J., Tan, Y., Guo, M., Gu, Y., Xu, S., & Zhou, Y. (2019). Temporospatial variations and Spearman correlation analysis of ozone concentrations to nitrogen dioxide, sulfur dioxide, particulate matters and carbon monoxide in ambient air, China. *Atmospheric Pollution Research*, 10(4). P. 1203–1210. DOI: 10.1016/j.apr.2019.02.003.

25. Zhang, J., Chen, T., Li, H., Tu, S., Zhang, L., Hao, T., & Yan, B. (2023). Mineral phase transition characteristics and its effects on the stabilization of heavy metals in industrial hazardous wastes incineration (IHWI) fly ash via microwave-assisted hydrothermal treatment. *Science of The Total Environment*, 877, 162842. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162842.
26. Han, Y., Ma, H., Liu, Y., Zhao, Y., & Li, L. (2021). Effects of goat milk enriched with oligosaccharides on microbiota structures, and correlation between microbiota and short-chain fatty acids in the large intestine of the mouse. *Journal of Dairy Science*, 104(3), 2773–2786. DOI: 10.3168/jds.2020-19510.
27. Joo, H. Y., Kim, J. W., & Moon, J. H. (2020). Use of big data analysis to investigate the relationship between natural radiation dose rates and cancer incidences in Republic of Korea. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(8), 1798–1806. DOI: 10.1016/j.net.2020.01.015.
28. Alvarenga, P., Mourinha, C., Farto, M., Santos, T., Palma, P., Sengo, J., Morais, M.-C., & Cunha-Queda, C. (2015). Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors. *Waste Management*, 40, 44–52. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.01.027.
29. Yang, X., Li, Q., Tang, Zh., Zhang, W., Yu, G., Shen, Q., & Zhao, F.-J. (2017). Heavy metal concentrations and arsenic speciation in animal manure composts in China. *Waste Management*, 64, 333–339. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.03.015.