



УДК 63:632.2:502:519.2

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.7.2024.23>

**ВИКОРИСТАННЯ РЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ В МОДЕЛЮВАННІ
ЕКОЛОГІЧНОЇ СИТУАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГНОЗУВАННЯ ПЕРЕХОДУ
ТОКСИЧНИХ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ З КОРМІВ РАЦІОНУ ДІЙНИХ КОРІВ
В ОРГАНІЧНІ ВІДХОДИ Й АКУМУЛЯЦІЇ ПОЛЮТАНТІВ У ГРУНТІ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ СКОТАРСЬКИХ ПІДПРИЄМСТВ**

С. В. Портянник¹

Важкі метали мають високу екологічну небезпеку для агроecosистем. Кадмій та свинець безперешкодно переміщуються в трофічних ланцюгах. З корму дійних корів потрапляють в органічні відходи, далі як добрива вносяться в ґрунт і акумулюються у високих концентраціях. Поведінка токсичних важких металів Cd і Pb в компонентах біосфери не прогнозована, що ускладнює ведення агропромисловості, особливо органічно-біологічного землеробства, виробництво екологічно безпечної продукції тваринництва та рослинництва. Кореляційний і регресійний аналіз статистичної обробки даних, дозволяють вченим з різних країн США, Європейського Союзу, Китаю і ін. перевірити в дослідженнях та рекомендувати до застосування на практиці в екологічному моніторингу моделей прогнозування навантаження ґрунту важкими металами, встановити вірогідні джерела надходження, динаміку розсіювання у довкіллі тощо. Попередні дослідження зосереджувалися на концентраціях забруднення важкими металами Cd, Pb і ін. кормів для дійних корів, молока, органічних відходів, досліджувався сам кореляційний зв'язок, але методом Спірмена. Аналіз даних здійснювався за результатами науково-господарського дослідження проведеного на дійних коровах з різними типами годівлі в лісо-степовій зоні України. Корів відібрано методом аналогів за живою масою та продуктивністю. До раціону входили корми з надлишком кадмію та свинцю. Токсичність поллютантів вплинула на перехід їх з кормів раціону в продукцію і органічні відходи. Мета досліджень аналіз кореляційного зв'язку та побудова рівнянь регресії між концентрацією важких металів Cd, Pb в кормах раціону дійних корів та їх органічних відходах за різних типів годівлі, що дозволить прогнозувати перехід поллютантів в органічні відходи (добрива), забруднення ґрунту, здійснювати ефективний екологічний моніторинг, вчасно оцінювати екологічні ризики в скотарських підприємствах чи господарствах з органічно-біологічним типом землеробства. За допомогою комп'юторної програми STATISTICA версії 10.0. зроблено кореляційний аналіз за параметричним коефіцієнтом кореляції Пірсона з урахуванням тестів Колмогорова-Смірнова та Лілієфорса (Kolmogorov-Smirnov and Lilliefors test for normality) і тесту Шапіро – Уїлка (Shapiro-Wilk's W test). Для моделювання залежності між змінною Y (концентрація важких металів в органічних відходах) та векторною змінною X (концентрація важких металів в кормах раціону) застосовували побудову рівнянь лінійної регресії. Характер зв'язку перевіряли за побудовою діаграм розсіювання (Scatterplot); аналіз залишків на відповідність закону нормального розподілу (Гауссова); оцінку прийнятності моделі у цілому за рівнем вірогідності методом ANOVA; якість регресії за допомогою коефіцієнту детермінації R². Аналіз встановив високу r=0.72-0.75 (Cd) (p<0.05), r=0.68 (Pb) (p<0.05) та дуже високу r=0.82 (Cd) (p<0.05), r=0.81 (Pb) (p<0.05) кореляційну залежність між

¹ кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри екології та біотехнологій в рослинництві
(Державний біотехнологічний університет, м. Харків)
e-mail: portynnyk@i.ua
ORCID: 0000-0001-5716-7352

вмістом токсикантів у кормах і органічних відходах, дозволив побудувати відповідні лінійні рівняння регресії, запропонувати найбільш вірогідні з них $Y = -0.0365 + 0.0054 \times X$ по Cd та $Y = 2.1195 + 6.8156 \times X$ по Pb для прогнозування переходу політантів в органічні відходи (добрива). Перевірені моделі, дадуть максимально точний результат концентрації політантів по Cd за даними експерименту з силосно-коренеплодним типом годівлі тварин, по Pb з силосно-сінажно-концентратним типом. Фахівці можуть використовувати моделі для екологічного моніторингу агроєкосистем, прогнозування ризиків забруднення та екологічно безпечного ведення як традиційного, так і органічно-біологічного землеробства. Подальші дослідження спрямовані на кореляційний та регресійний аналіз за іншими важливими у ветеринарній, зоотехнічній і екологічній практиці показниками екологічної безпеки з оцінкою відповідних ризиків ведення галузі скотарства у лісостеповій зоні України.

Ключові слова: кореляція, регресія, корма раціону, органічні добрива, екологічний ризик, велика рогата худоба.

THE USE OF REGRESSION ANALYSIS IN MODELING THE ECOLOGICAL SITUATION BY PREDICTING THE TRANSITION OF TOXIC HEAVY METALS CADMIUM AND LEAD FROM THE FODDER OF THE RATION OF DAIRY COWS INTO ORGANIC WASTE AND THE ACCUMULATION OF POLLUTANTS IN THE SOIL OF AGRICULTURAL AND LIVESTOCK ENTERPRISES

S. V. Portiannik

Heavy metals have a high environmental hazard for agro-ecosystems. Cadmium and lead move freely in trophic chains. From the fodder of dairy cows, they fall into organic waste, then fertilizers are applied to the soil and accumulate in high concentrations. The behavior of toxic heavy metals Cd and Pb in the components of the biosphere is not predicted, which complicates the conduct of agricultural production, especially organic and biological farming, the production of ecologically safe animal husbandry and crop production. Correlation and regression analysis of statistical data processing allow scientists from various countries of the USA, the European Union, China, etc. to check in research and recommend for practical application in ecological monitoring models for predicting soil load with heavy metals, establish probable sources of input, dynamics of dispersion in the environment, etc. Previous studies focused on the concentrations of contamination by heavy metals Cd, Pb, etc. fodder for dairy cows, milk, organic waste, the correlation itself was investigated, but using the Spearman method. Data analysis was carried out based on the results of a scientific and economic experiment conducted on dairy cows with different types of feeding in the forest-steppe zone of Ukraine. Cows were selected by the method of analogues for live weight and productivity. The diet included feed with an excess of cadmium and lead. The toxicity of pollutants affected their transition from feed to products and organic waste. The purpose of the research is to analyze the correlation relationship and build regression equations between the concentration of heavy metals Cd, Pb in the feed of the ration of dairy cows and their organic waste under different types of feeding, which will allow predicting the transition of pollutants into organic waste (fertilizers), soil pollution, carry out effective environmental monitoring, timely assess environmental risks in livestock enterprises or farms with organic-biological type of agriculture. Using the computer program STATISTICA version 10.0. a correlation analysis was performed using the parametric Pearson correlation coefficient, taking into account the Kolmogorov-Smirnov and Lilliefors test for normality and the Shapiro-Wilk's W test. Linear regression equations were used to model the relationship between variable Y (concentration of heavy metals in organic waste) and vector variable X (concentration of heavy metals in feed). The nature of the relationship was checked by constructing scatter diagrams (Scatterplot); analysis of residuals for compliance with the law of normal distribution (Gauss-owl); assessment of the acceptability of the model as a whole according to the level of probability by the ANOVA method; regression quality using the coefficient of determination R^2 . The analysis established high $r = 0.72 - 0.75$ (Cd) ($p < 0.05$), $r = 0.68$ (Pb) ($p < 0.05$) and very high $r = 0.82$ (Cd) ($p < 0.05$), $r = 0.81$ (Pb) ($p < 0.05$) correlation dependence between the content of toxicants in feed and organic waste, made it possible to construct appropriate linear regression equations, to propose the most probable of them $Y = -0.0365 + 0.0054 \times X$ for Cd and $Y = 2.1195 + 6.8156 \times X$ for Pb for predicting the transition pollutants in organic waste (fertilizers). The tested models will give the most accurate result of the pollutant concentration for Cd according to the data of the experiment with the silage-root type of animal feeding, for Pb with the silage-hay-concentrate type. Specialists can use the models for ecological monitoring of agro-ecosystems, forecasting of pollution risks and ecologically safe management of both traditional and organic-biological agriculture. Further research is aimed at correlational and regression analysis of other important indicators of environmental safety in veterinary, zootechnical and ecological practice, with an assessment of the relevant risks of cattle breeding in the forest-steppe zone of Ukraine.

Key words: correlation, regression, forage, organic fertilizers, ecological risk, cattle.

Вступ

Техногенний вплив на довкілля підприємств розвинених урбанізованих промислових центрів, вихлопні гази автотранспорту, агрохімікати, органічні відходи, що утворюються в газузі тваринництва інші небезпечні фактори сучасної цивілізації, на жаль, негативно відбивають на стані екологічних систем, особливо ґрунтів, де вирощуються рослини, які йдуть на корм сільськогосподарським тваринам в т.ч. дійним коровам або застосовуються як їжа для харчування людини. Досить гострою є проблема забруднення агроєкосистем важкими металами в різних країнах світу, особливо в Китаї (Yazhu et al., 2020). Серед найбільш небезпечних важких металів кадмій, свинець, ртуть, миш'як. Дані полютанти всюдисущі, вплив їх на довкілля часто не прогнозований. Забруднення ґрунту важкими металами має потенційний екологічний ризик, а забруднення врожаю важкими металами, робить неможливим ведення органічно-біологічного землеробства, може спричинити ризик для здоров'я людини (Mingtao et al., 2021). Виробництво екологічно безпечного молока навколо розвинених промислових центрів теж має потенційний екологічний ризик.

Науковцями (Kuramshina et al., 2014) досліджено процес міграції важких металів із ґрунту у рослини (корми) і організм тварин в зоні впливу нафтових, рудних родовищ з метою біологічної індикації стану екосистеми та оцінки екологічної безпеки виробництва продукції тваринництва в різних сільськогосподарських районах. Авторами була ретельно досліджена центральна частина республіки з домінуючим сільськогосподарським комплексом як фоновою територією. Визначалися концентрації елементів в ґрунті, кормах, встановлено коефіцієнти переходу важких металів з кормів в організм тварин, оцінено вплив антропогенних факторів на забруднення навколишнього середовища важкими металами. Висновки зроблені вченими в даній ситуації не складні, але надзвичайно важливі з практичної точки зору – чим більше елементів надходило у довкілля, забруднюючи агроєкосистему, рослини (корми), тим більше їх споживалося тваринами.

Вчені з Бангладеш (Sazal et al., 2021) детально досліджували забруднення ґрунту і виявили 54 небезпечних токсиканти. Було відібрано 40 проб ґрунту навколо п'яти печей з виробництва цегли. В обробці результатів

дослідження використовувалася багатофакторна статистика. Дослідники стверджують, що крім спалювання вугілля в печах, забруднення ґрунту здійснює ведення сільського господарства (рис. 1). Зміни концентрацій важких металів були нелінійними залежно від відстані між печами та точками відбору проб.

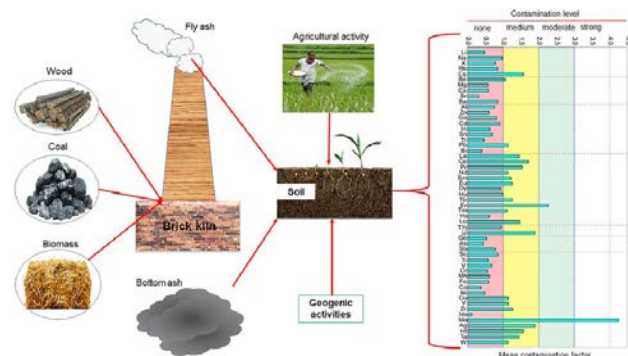


Рис. 1. Загальна схема досліджень забруднення ґрунтів важкими металами (Sazal et al., 2021)

Екологічний моніторинг забруднення довкілля важкими металами досить складний процес. Вітчизняні (Kozulya et al., 2004) і закордонні вчені (Ashraf Abdul Abedin Asha et al., 2023) для вирішення відповідних задач екологічного моніторингу ставлять перед собою завдання розробити перевірені в наукових дослідженнях математичні моделі з прогнозування забруднення екосистем важкими металами. Дослідники використовують під час статистичного аналізу отриманих результатів досліджень дво- і багатофакторний кореляційний аналіз між важкими металами в різних компонентах біосфери з побудовою відповідних рівнянь регресії для прогнозування рівня забруднення за допомогою перевірених моделей.

Екологічний моніторинг фіксує великі техногенні навантаження полютантів на агроєкосистему багатьох господарств, де утримується поголів'я великої рогатої худоби в т.ч. дійних корів. В період війни та у післявоєнний період ситуація не покращиться, а навпаки значно погіршиться і буде ще більш складною. Проведення експериментів з дослідження міграції токсичних металів у трофічному ланцюзі і отримання відповідного масиву цифрових даних цілого ряду показників зроблених лабораторних аналізів не завжди може вказати на високу закономірність певних змін. Вчені (Mingtao et al., 2021) досліджували кореляційний

зв'язок вмісту важких металів у ґрунті і рослинах, які вирощуються для оцінки ризику забруднення сільськогосподарських культур та прогнозування небезпеки шкідливого впливу токсичних металів, особливо ртуті, кадмію, на організм людини. Науковці здебільшого звертали увагу на забруднення ґрунту і рослин важкими металами та не звертали уваги на зв'язок між ними. Результати показали, що досліджувані токсичні метали у ґрунті мали найбільший вплив на рівень цинку в рослинах, а Pb, Cr – мали синергічний вплив на поглинання Zn рослинами. Експерименти доводять важливість кореляційного аналізу для контролю ризику забруднення, котрий до цього не враховувався. Прикладів застосування кореляційного і регресійного аналізу можна навести багато як у сільському господарстві, так і в інших галузях пов'язаних з забрудненням довкілля в різних країнах світу, але вивчення кореляційного зв'язку між вмістом токсичних металів в кормах раціону дійних корів та органічних відходах тваринництва з побудовою відповідних рівнянь регресії зроблено нами вперше і є актуальним дослідженням.

Хімічний аналіз кормів раціону дійних корів в агропідприємствах здійснюється фахівцями майже регулярно в т.ч. на вміст токсичних важких металів на відміну від аналізу органічних відходів. Дослідження кореляції між вмістом токсичних металів в кормах та органічних відходах тварин є зручним і досить надійним індикатором прогнозу екологічної безпеки ґрунтів (оцінки ризику) в господарстві, застосування перевірених рівнянь регресії доповнює інструментарій екологічного моніторингу агроєкосистем.

Метою досліджень є побудова математичних моделей для прогнозування екологічної ситуації за допомогою перевірених рівнянь лінійної регресії з урахуванням сили кореляційної залежності між концентрацією токсичних важких металів кадмію, свинцю в кормах раціону корів і їх органічних відходах, оцінкою ризику забруднення ґрунту небезпечними поліутантами в зоні діяльності агропідприємств з виробництва молока.

Матеріал і методи

Науково-господарський дослід на дійних коровах української чорно- та червоно-рябої молочних порід з виробництва екологічно безпечного молока проведено в господарствах розташованих навколо промислового міста лісостепової зони України. Для експе-

рименту відібрали 126 голів корів з силосно-сінажно-концентратним типом годівлі, 63 з силосно-сінажним, 36 – силосно-коренеплодним та 195 з силосно-сінним типом годівлі відповідно. Тваринам усіх груп згодовували корми з вмістом важких металів Cd та Pb вище встановлених гранично допустимих концентрацій (ГДК). Середня жива маса корів – 500-545 кг. Порівняльний період становив 42 дні. Корови відібрані методом аналогів за живою масою, продуктивністю знаходилися в однакових умовах годівлі та утримання. Дослід тривав 120 днів. Біохімічний аналіз зразків рослинного та тваринного походження на вміст макро-, мікроелементів, токсичних важких металів і ін. проведено методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії (спектрофотометр ААС-30. Метод екологічного моніторингу екосистем застосовується постійно починаючи з 2000 року по сьогодні у відповідності до етапів виконання НДДКР Державний реєстраційний номер: 0121U113933 від 18.11.2021 року.

Усі маніпуляції з тваринами проводили відповідно до Європейської конвенції про захист хребетних тварин, яких використовують з експериментальною та науковою метою (European ..., 1986).

Аналіз даних проводився з урахуванням особливостей отриманих у дослідженні результатів: розміру вибірки та типу розподілу даних, характеру дисперсій. Кореляційну залежність вважали статистично вірогідною за $p < 0.05$. Кореляційний аналіз здійснювався за параметричним коефіцієнтом кореляції Пірсона з урахуванням тестів Колмогорова-Смірнова та Лілієфорса (Kolmogorov-Smirnov and Lilliefors test for normality) і тесту Шапіро – Уїлка (Shapiro-Wilk's W test). Для методу моделювання залежності між змінною Y (концентрація важких металів в органічних відходах) та векторною змінною X (концентрація важких металів в кормах раціону) застосовували побудову рівнянь лінійної регресії. Характер зв'язку між показниками перевіряли за допомогою побудови діаграм розсіювання (Scatterplot). Аналіз залишків перевіряли на відповідність закону нормального розподілу (Гауссова). Оцінку прийнятності моделі уцілому за її рівнем вірогідності оцінювали методом ANOVA. Якість розрахованої регресії перевіряли за допомогою коефіцієнту детермінації R^2 . Вважали якщо R^2 менше 0.3 (менше 30% дуже низький рівень) модель скоріше за все вірогідно

працювати nebude. Розрахунок проводився в пакеті програм STATISTICA версії 10.0 для операційної системи Windows 7.

Результати

Підвищена концентрація токсичних важких металів кадмію та свинцю в кормах раціону дійних корів спричинила перехід їх не лише в продукцію (молоко), але і органічні відходи тварин. Регресійний аналіз, одночасно з кореляційним, є одним з найбільш розповсюджених методів обробки отриманих експериментальних даних при вивченні закономірностей як серед вітчизняних, так і закордонних вчених. Суть даного аналізу полягає у визначенні того, яким чином зміна однієї величини (залежного фактора) обумовлюється впливом однієї чи декількох незалежних величин (незалежних факторів). Регресійний аналіз належить до групи параметричних методів статистичного аналізу, відповідно його застосування потребує виконання ряду обов'язкових умов: 1. лінійний характер залежності; 2. «нормальний» розподіл даних. Умовою, котра визначає можливість застосування параметричних чи непараметричних методів аналізу, є встановлення відповідності досліджуваних даних закону нормального (Гауссова) розподілу, графічне відображення котрого має вигляд властивий цзвіноподібній кривій. У випадку коли досліджувані дані підпорядковуються закону нормального розподілу (Гауссова) застосовують параметричні методи кореляційного та регресійного аналізу, а коли досліджувані дані не підпорядковуються закону нормального розподілу непараметричні методи. Застосування параметричних методів аналізу для даних, що не підпорядковуються закону нормального розподілу (Гауссова), приводить до висновків, котрі не відповідають дійсності. Щоб уникнути помилок аналіз будь-яких отриманих даних результатів лабораторного аналізу повинен розпочинатися з перевірки «нормальності» розподілу.

Перший етап. Встановлення відповідності отриманих результатів досліджень закону нормального (Гауссова) розподілу. Оскільки тест хі-квадрат досить часто призводить до помилкового висновку про «нормальність» розподілу, що відбулося і в нашому випадку, потужність його відносно невисока, ми застосували більш потужні і надійні тести Kolmogorov-Smirnov and Lilliefors test for normality та Shapiro-Wilk's W test. Дані тести перевіряють гіпотезу про відсутність відмінностей між спостережуваним і теоре-

тично очікуваним, «нормальним» розподілом. Найбільшою потужністю, особливо за невеликих вибірок ($n < 50$), як в нашому випадку, володіє Shapiro-Wilk's W test. На рисунку 2-3 наведено результати обох тестів по концентрації кадмію та свинцю в кормах для корів і їх органічних відходах за різних типів годівлі тварин.

Результати обох тестів автоматично розташовуються в заголовку графіка (гістограма) (рис. 2-3). Вірогідність за тестом Shapiro-Wilk's W test по концентрації кадмію в кормах становить $p=0.163$, $p=0.215$, $p=0.564$, $p=0.161$, а по вмісту поліюганта в органічних відходах $p=0.846$, $p=0.484$, $p=0.996$, $p=0.294$ відповідно, що значно більше, ніж 0.05 ($p > 0.05$). Тест Kolmogorov-Smirnov в усіх випадках був так само більшим за 0.05 і становив $p > 0.20$. Lilliefors test for normality теж був вищим за 0.05, як і тест Kolmogorov-Smirnov $p > 0.20$, лише у корів з силосно-сінажно-концентратним типом годівлі вірогідність становила $p < 0.15$. За концентрацією свинцю в кормах вірогідність за тестом Shapiro-Wilk's W test становить $p=0.103$, $p=0.654$, $p=0.782$, $p=0.871$, а по вмісту поліюганта в органічних відходах $p=0.940$, $p=0.062$, $p=0.844$, $p=0.577$, що також значно більше, ніж 0.05 ($p > 0.05$). Тест Kolmogorov-Smirnov теж, як і по концентрації кадмію, в усіх випадках був більшим за 0.05 і становив $p > 0.20$. Lilliefors test for normality був вищим за 0.05, як і тест Kolmogorov-Smirnov $p > 0.20$, лише у корів з силосно-коренеплодним типом годівлі вірогідність становила $p < 0.20$ (рис. 2-3).

Виходячи зі зробленого аналізу, за всіма проведеними тестами помилка значно більша ніж 0.05 ($p > 0.05$), гіпотеза правильна, розподіл даних, що складає відповідні вибірки статистично не відрізняється від нормального. Такий розподіл можна вважати нормальним, таким, що відповідає (підпорядковується) закону «нормального» розподілу (Гауссова). Тому далі для точності кореляційного і регресійного аналізу ми вибираємо параметричні методи. Кореляційний аналіз проводимо методом Пірсона, а не Спірмена, а регресійний аналіз здійснюємо без лагорифмічної трансформації даних.

Другий етап. Кореляційний аналіз. В меню Statistics / Basic Statistics/Tables / Correlation Matrices, програми STATISTICA версії 10.0, у Twolists (rect. matrix) вибираємо стовбці, що містять необхідні дані і натискаємо піктограму Summary:

Correlation matrix. З'явиться таблиця з результатами аналізу. На рисунку 4-5 наведено розраховані коефіцієнти кореляції Пірсона між вмістом токсичних елементів (Cd і Pb) в кормах раціону дійних корів та їх органічних відходах за різних типів годівлі.

Коефіцієнт кореляції між вмістом важких металів кадмію та свинцю в кормах

раціону і органічних відходах дійних корів в усіх проаналізованих випадках був позитивним, переважно високим, а в окремих випадках навіть дуже високим від $r=0.69$ до $r=0.82$, що вказує на прямий високий ступінь взаємозв'язку. Найменшим на рівні $r=0.53$ (середня кореляція) був встановлений кореляційний зв'язок між показниками

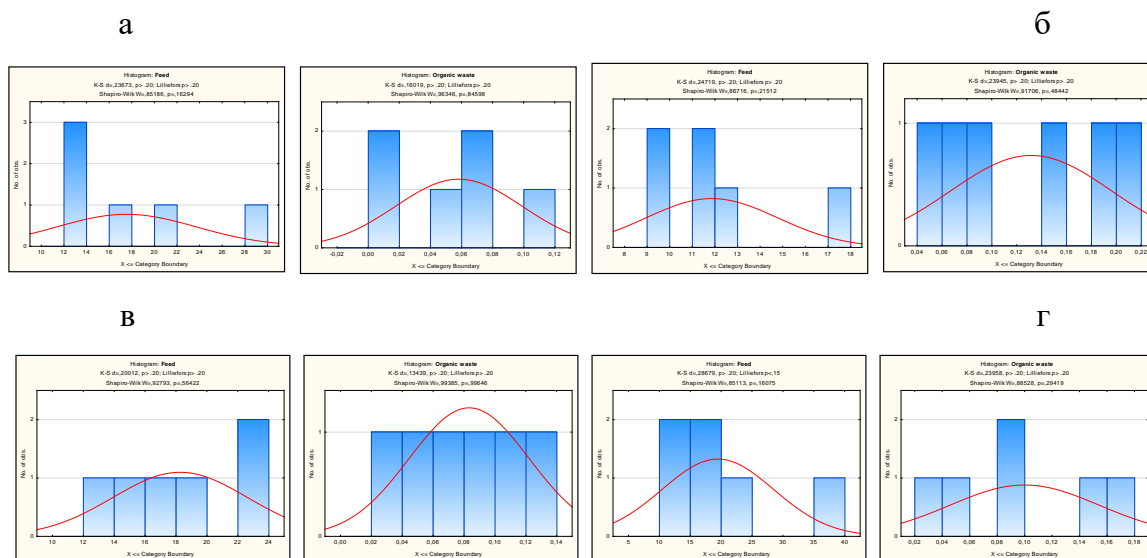


Рис. 2. Аналіз розподілу досліджуваних показників вміст Cd в кормах раціону корів (мг/кг) за тестами Kolmogorov-Smirnov and Lilliefors test for normality та Shapiro-Wilk's W test типи годівлі: а – силосно-коренеплодний; б – силосно-сінний; в – силосно-сінажний; г – силосно-сінажно-концентратний

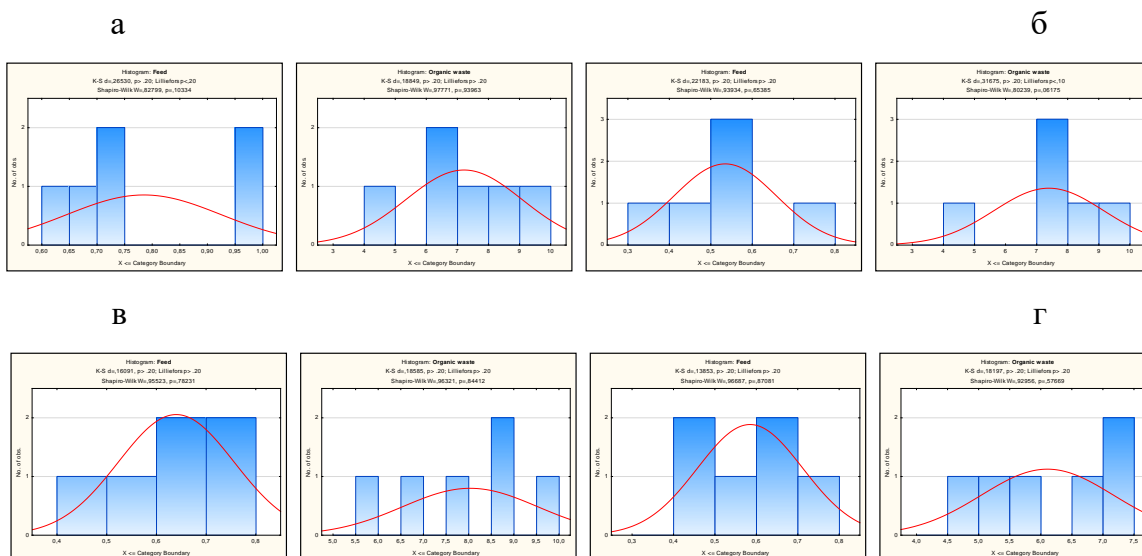


Рис. 3. Аналіз розподілу досліджуваних показників вміст Pb в кормах раціону корів (мг/кг) за тестами Kolmogorov-Smirnov and Lilliefors test for normality та Shapiro-Wilk's W test типи годівлі: а – силосно-коренеплодний; б – силосно-сінний; в – силосно-сінажний; г – силосно-сінажно-концентратний

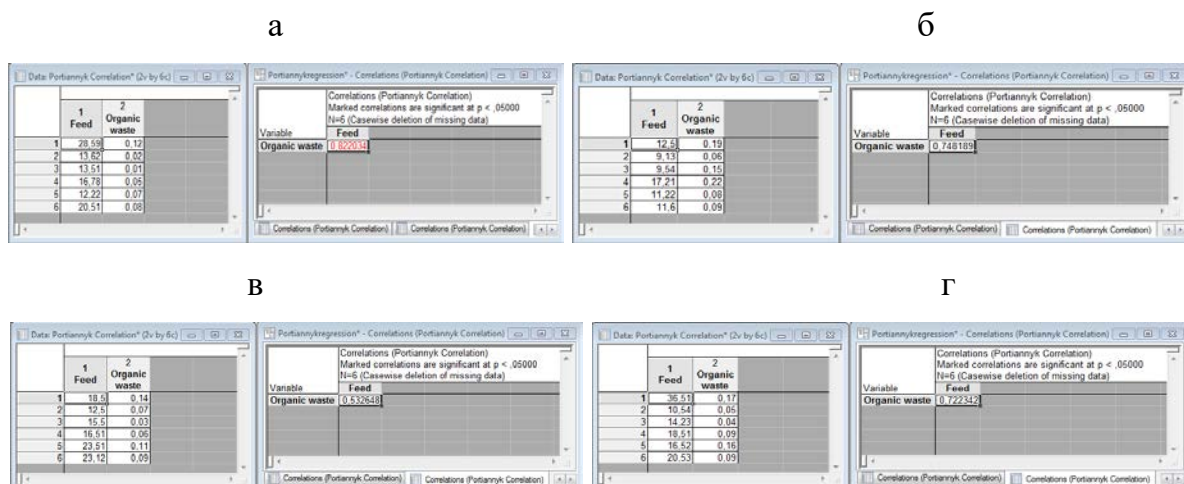


Рис. 4. Записані у вікно програми показники вмісту Cd мг/кг в кормах раціону та органічних відходах корів n=6 і коефіцієнт кореляції Пірсона між вмістом елемента в кормах раціону і органічних відходах тварин типи годівлі:
 а – силосно-коренеплодний; б – силосно-сінний; в – силосно-сінажний;
 г – силосно-сінажно-концентратний

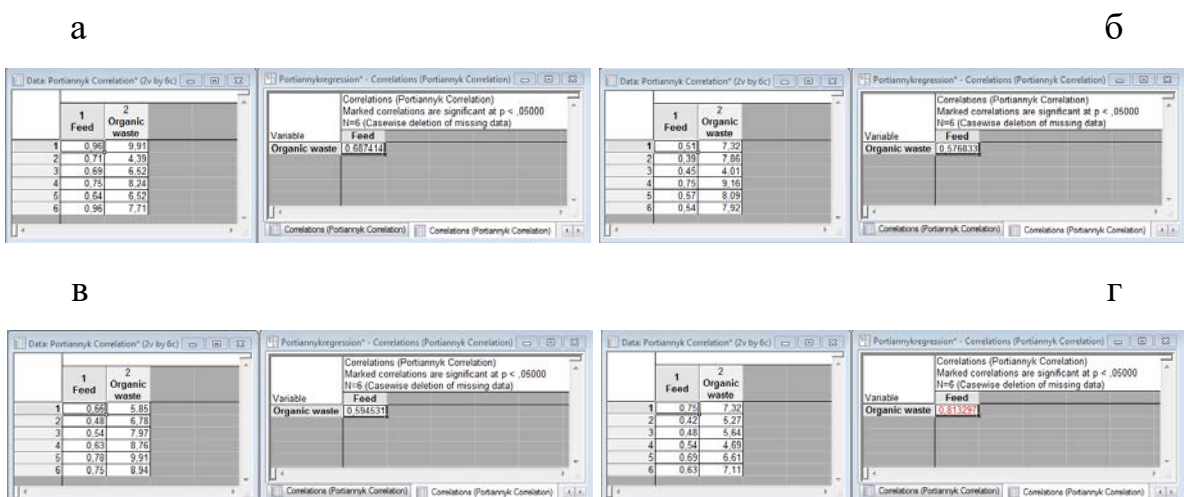


Рис. 5. Записані у вікно програми показники вмісту Pb мг/кг в кормах раціону та органічних відходах корів n=6 і коефіцієнт кореляції Пірсона між вмістом елемента в кормах раціону і органічних відходах тварин типи годівлі:
 а – силосно-коренеплодний; б – силосно-сінний; в – силосно-сінажний; г – силосно-сінажно-концентратний

у корів з силосно-сінажним типом годівлі по концентрації кадмію. На рівні середнього $r=0.58$ кореляційний зв'язок встановлений також за вмістом свинцю у тварин з силосно-сінним типом годівлі та $r=0.60$ у корів з силосно-сінажним типом годівлі ($p < 0.05$). Найвищим коефіцієнт кореляції встановлено за вмістом кадмію у корів з силосно-коренеплодним типом годівлі $r=0.83$ (дуже висока кореляція) ($p < 0.05$) та

за вмістом свинцю у корів з силосно-сінажно-концентратним типом годівлі $r=0.81$ (дуже висока кореляція) ($p < 0.05$). Дуже високий кореляційний зв'язок програма виділяє червоним кольором (див. рис. 4-5). Програма одночасно встановлює і статистичну вірогідність, котра в усіх досліджених випадках становила $p < 0.05$. Тобто вірогідність отриманих результатів є достатньо високою.

За вмістом Cd найслабшим кореляційний зв'язок встановлений у тварин з силосно-сінажним типом годівлі $r=0.53$ (середня кореляція) ($p<0.05$), більш сильним він був у корів з силосно-сінажно-концентратним $r=0.73$ (висока кореляція) ($p<0.05$) та силосно-сінним $r=0.75$ (висока кореляція) ($p<0.05$), дуже високою кореляційна залежність була у тварин з силосно-коренеплодним типом годівлі $r=0.83$ ($p<0.05$) (рис. 4-5). За вмістом Pb найслабший кореляційний зв'язок встановлений у тварин з силосно-сінним типом годівлі $r=0.58$ (середня кореляція) ($p<0.05$), більш сильним він був у корів з силосно-сінажним типом $r=0.60$ (середня кореляція) ($p<0.05$) та силосно-коренеплодним типом годівлі $r=0.69$ (висока кореляція) ($p<0.05$), дуже високою кореляційна залежність була у тварин з силосно-сінажно-концентратним типом годівлі $r=0.81$ ($p<0.05$) (див. рис. 4-5).

Корми, що входили до складу різних раціонів мали підвищений рівень концентрації даних небезпечних елементів поллютантів: у корів з силосно-коренеплодним типом годівлі перевищення гранично допустимої концентрації Cd становило у сіні злаково-бобовому у 5.7 раза, соломі пшеничній та силосі кукурудзяному у 2.7 раза, сінажі люцерновому 3.4, буряку кормовому 2.4 та дерті кукурудзяній у 4.1 раза відповідно і по Pb у 3.2, 2.4, 2.3, 2.5, 2.1, 3.2 раза відповідно; у корів з силосно-сінним типом годівлі перевищення ГДК Cd становило в соломі пшеничній у 2.5 раза, силосі кукурудзяному 1.8, сінажі люцерновому 1.9, буряку кормовому 3.4, сіні люцерновому 2.2 та дерті ячмінній у 2.3 раза відповідно і по Pb у 1.7, 1.3, 1.5, 2.5, 1.9, 1.8 раза відповідно; у корів з силосно-сінажним типом годівлі перевищення ГДК Cd становило в сіні злаково-бобовому у 3.7 раза, силосі кукурудзяному 2.5, сінажі люцерновому 3.1, сіні люцерновому 3.3, дерті гороховій 4.7 та дерті вівсяній у 4.6 раза відповідно і по Pb у 2.2, 1.6, 1.8, 2.1, 2.6, 2.5 раза відповідно; у корів з силосно-сінажно-концентратним типом годівлі перевищення ГДК Cd становило у сіні злаково-бобовому у 7.3 раза, силосі кукурудзяному 2.1, сінажі люцерновому 2.8, дерті кукурудзяній 3.7, сіні люцерновому 3.3 та дерті гороховій у 4.1 раза відповідно і по Pb у 2.5, 1.4, 1.6, 1.8, 2.3, 2.1 раза відповідно.

Таким чином, застосування параметричного методу аналізу у вигляді коефіцієнту кореляції Пірсона, за допомогою програми STATISTICA версії 10.0, дозволило розрахувати і тим самим достовірно ($p<0.05$) у всіх

випадках встановити середню, високу і дуже високу силу кореляційного зв'язку між важливими для експерименту показниками – вмістом токсичних металів Cd і Pb у кормах раціону дійних корів та їх органічних відходах за різних типів годівлі, що сприяє проведенню регресійного аналізу.

Третій етап. Регресійний аналіз. Перш, ніж безпосередньо провести регресійний аналіз, необхідно перевірити характер зв'язку між двома змінними з концентрації кадмію та свинцю. Для цього необхідно побудувати діаграми розсіювання. У вкладці Graphs вибираємо розділ Scatterplots у Variables встановлюємо відповідний незалежний фактор X (корм) і залежний фактор Y (органічні відходи) та отримуємо графік (рис. 6-7).

Розташування точок на діаграмі має відповідне розсіювання по полотну, немає скупчень чи зміщень в якомусь одному напрямку тощо. Більше того в заголовку діаграми ми маємо вже побудоване рівняння регресії (див. рис. 6-7).

Важливе значення в регресії має аналіз залишків. Тому спочатку побудуємо гістограму залишків і перевіримо на відповідність закону нормального розподілу (рис. 8-9).

Залишки розсіяні більш менш семантично (див. рис. 8-9). Гіпотеза нормальності не відхиляється. Також дивимося нормально-вірогіднісний графік залишків. Систематичних відхилень фактичних даних від теоретичної нормальної прямої не спостерігається. Значить залишки розподілені нормально. Перевіряємо наявність або відсутності залежності залишків від прогнозованих значень. Якогось певного системного напрямку руху точок не спостерігається. В іншому випадку нам довелося констатувати відповідну залежність. Точки не мають системності у своєму розташуванні. Розташовуються хаотично на полотні діаграми, що доводить незалежність залишків від прогнозованих значень (див. рис. 8-9). Всі умови виконані, аналіз залишків показав, що модель у нас за даним параметром досить добра.

Наступний крок оцінка прийнятності моделі у цілому. Для цього ми дивимося параметр ANOVA і рівень вірогідності (рис. 10-11).

Рівень вірогідності за концентрацією кадмію становить $p=0.04$, $p=0.09$, $p=0.28$, $p=0.10$, а свинцю $p=0.13$, $p=0.23$, $p=0.21$, $p=0.05$ відповідно (рис. 10-11). Найбільш

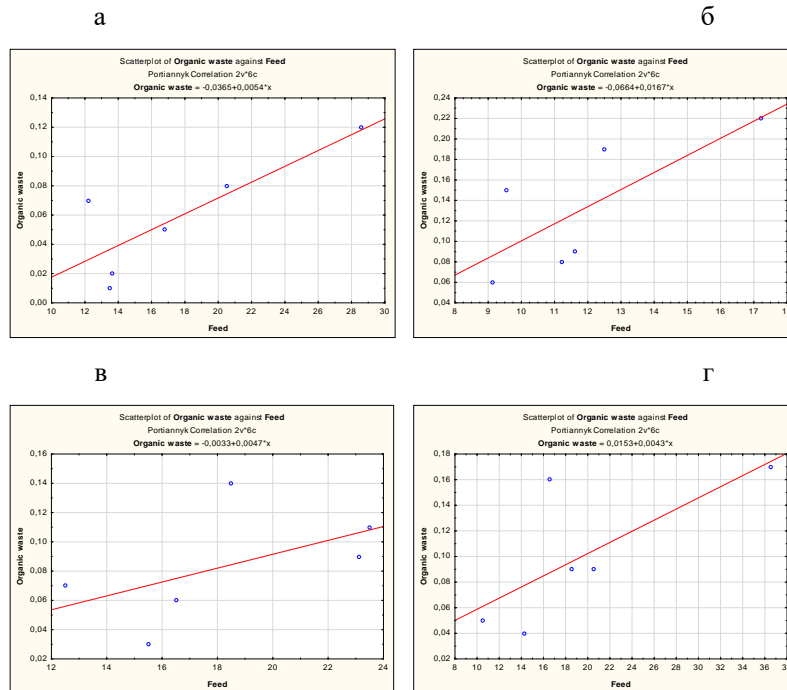


Рис. 6. Діаграма розсіювання для даних вміст Cd (мг/кг) у кормах раціону корів та їх органічних відходах з відповідним рівнянням регресії типу годівлі:
 а – силосно-коренеплодний $y = -0.0365 + 0.0054 \times x$; б – силосно-сінний $y = -0.0664 + 0.0167 \times x$;
 в – силосно-сінажний $y = -0.0033 + 0.0047 \times x$;
 г – силосно-сінажно-концентратний $y = 0.0153 + 0.0043 \times x$

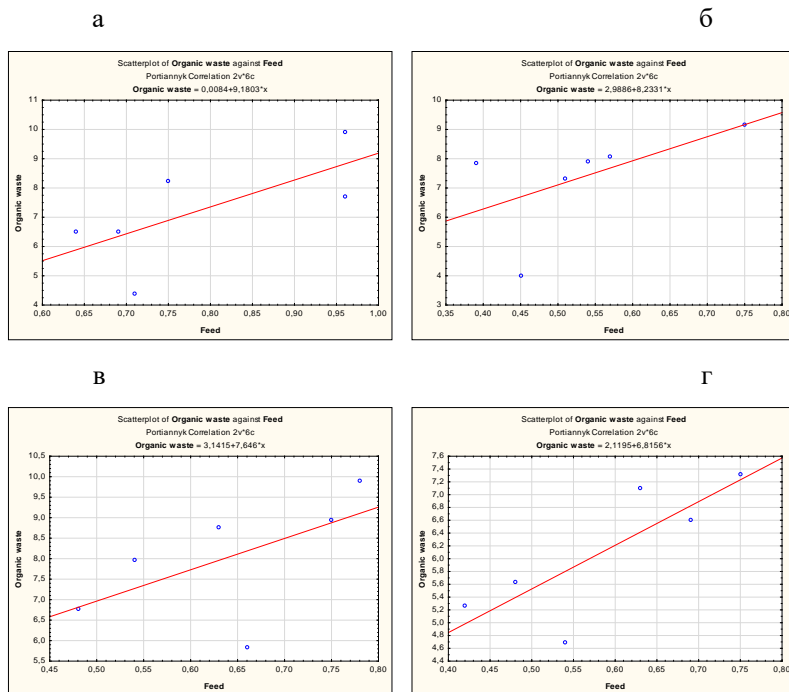


Рис. 7. Діаграма розсіювання для даних вміст Pb (мг/кг) у кормах раціону корів та їх органічних відходах з відповідним рівнянням регресії типу годівлі:
 а – силосно-коренеплодний $y = 0.0084 + 9.1803 \times x$; б – силосно-сінний $y = 2.9886 + 8.2331 \times x$;
 в – силосно-сінажний $y = 3.1415 + 7.646 \times x$; г – силосно-сінажно-концентратний $y = 2.1195 + 6.8156 \times x$

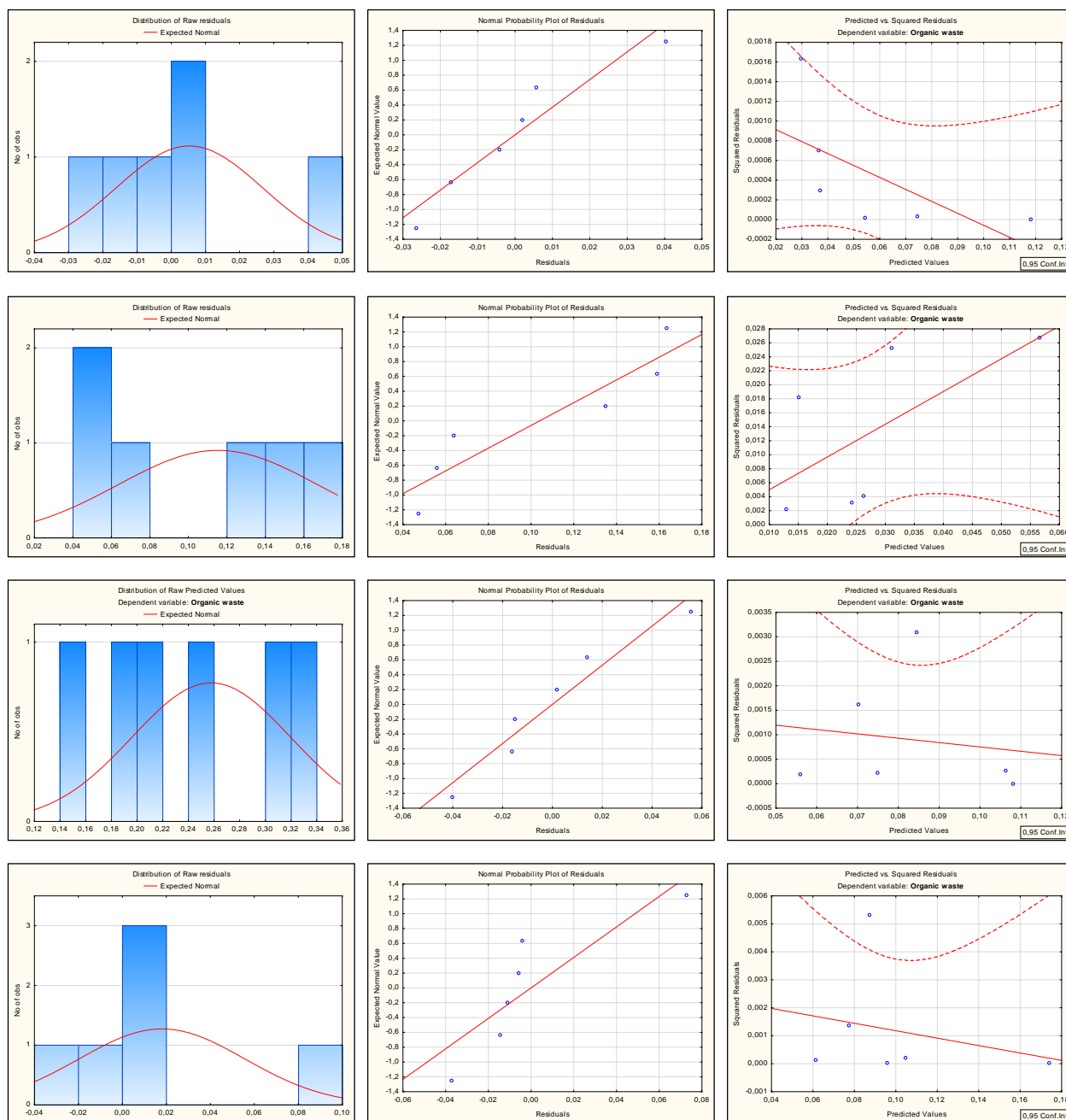


Рис. 8. Аналіз залишків за концентрацією Cd (мг/кг) у кормах раціону корів та їх органічних відходах типу годівлі: а – силосно-коренеплодний; б – силосно-сінний; в – силосно-сінажний; г – силосно-сінажно-концентратний

прийнятною буде модель за концентрацією кадмію у тварин з силосно-коренеплодним типом годівлі $p < 0.05$, а за вмістом свинцю модель у тварин з силосно-сінажно-концентратним типом годівлі $p < 0.05$ відповідно. Дані моделі працюватимуть значно краще ніж прогноз за середніми значеннями. Всі інші моделі не мають рівня вірогідності $p < 0.05$ тому точність прогнозу може бути гіршою.

Після аналізу ANOVA робимо аналіз детермінації R^2 (рис. 12-13). R^2 змінюється від 0 до 1 і вказує яка кількість факторів з тих, котрі впливають на відгук, врахована в моделі. R^2 по концентрації Cd становить 0.68 (68%) (силосно-коренеплодний тип годівлі); 0.56 (56%) (силосно-сінний); 0.28 (28%) (дуже низький) (силосно-сінажний); 0.52 (52%) (силосно-сінажно-концентратний). Якщо R^2 менше 0.3 (менше 30% дуже

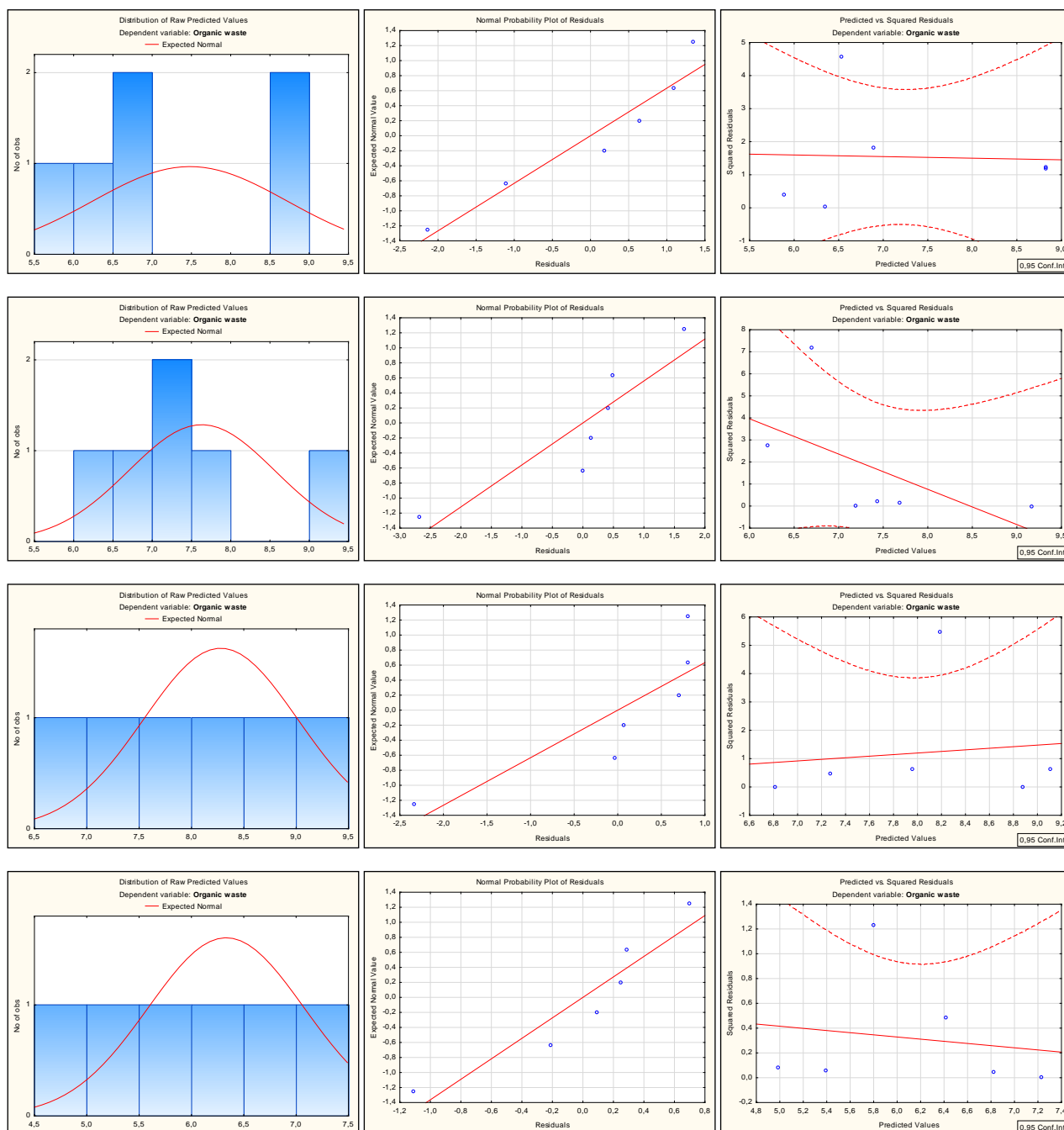


Рис. 9. Аналіз залишків за концентрацією Pb (мг/кг) у кормах раціону корів та їх органічних відходах типу годівлі: а – силосно-коренеплодний; б – силосно-сінний; в – силосно-сінажний; г – силосно-сінажно-концентратний

низький рівень) вказуватиме, що модель скоріше за все вірогідно працювати nebude. В нашому випадку є одна така модель у тварин з силосно-сінажним типом годівлі 0.28 (28%). Кількість факторів, що буде врахована при побудові моделі дуже низка і становить лише 28%, тому вірогідність прогнозу за таким рівнянням регресії теж буде низькою. R^2 по концентрації Pb ста-

новить 0.47 (47%) (силосно-коренеплодний тип годівлі); 0.33 (33%) (силосно-сінний); 0.35 (35%) (силосно-сінажний); 0.66 (66%) (силосно-сінажно-концентратний). За вмістом свинцю R^2 менше 0.3 (менше 30% дуже низький рівень) не виявлено. Кількість факторів, що врахована при побудові моделі висока. Значить всі моделі будуть працювати з достатньою вірогідністю. Всі рівні

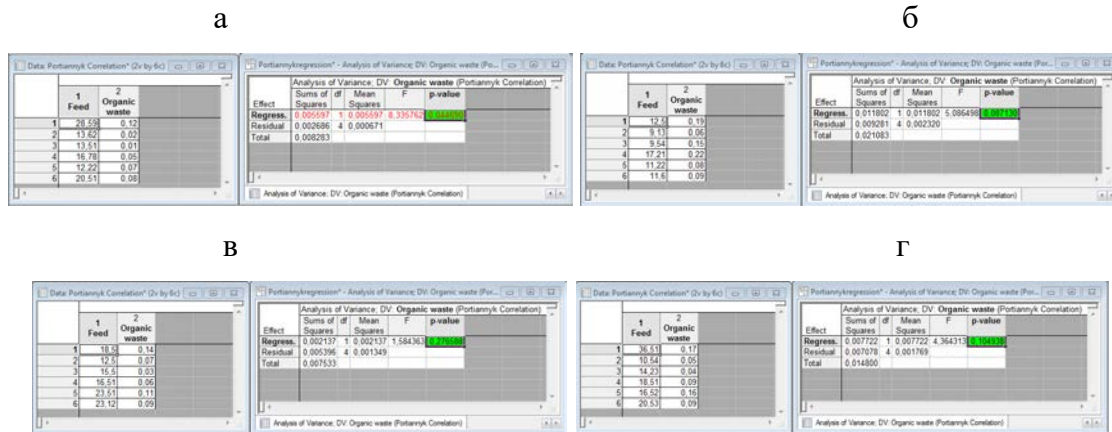


Рис. 10. Оцінка прийнятності моделі уцілому за концентрацією Cd (мг/кг) у кормах раціону корів та їх органічних відходах (ANOVA) типи годівлі: а – силосно-коренеплодний; б – силосно-сінний; в – силосно-сінажний; г – силосно-сінажно-концентратний

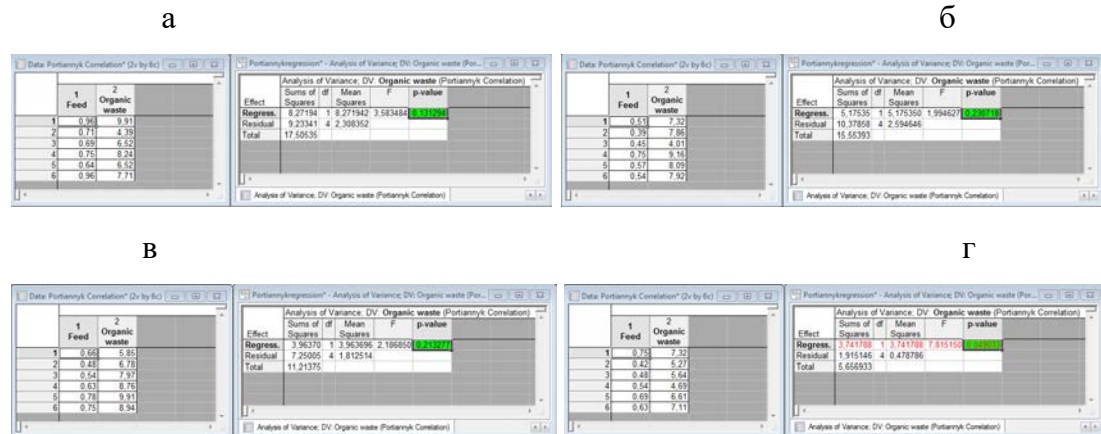


Рис. 11. Оцінка прийнятності моделі уцілому за концентрацією Pb (мг/кг) у кормах раціону корів та їх органічних відходах (ANOVA) типи годівлі: а – силосно-коренеплодний; б – силосно-сінний; в – силосно-сінажний; г – силосно-сінажно-концентратний

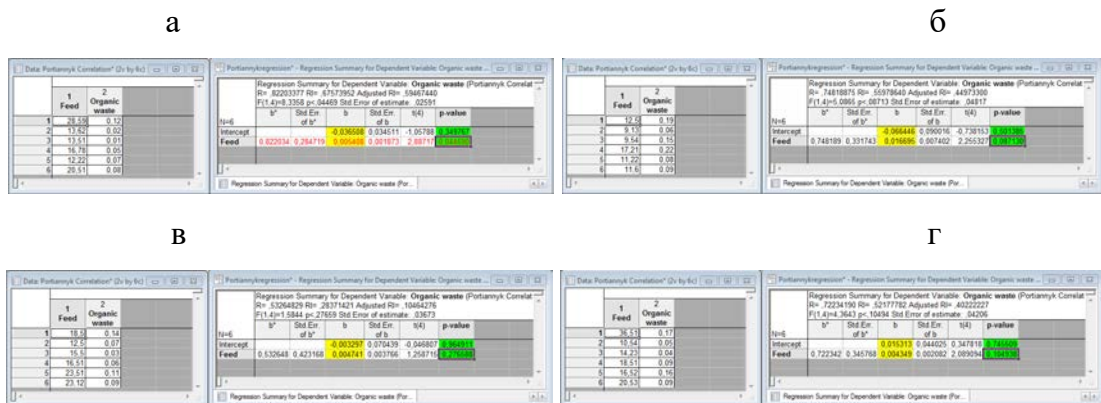


Рис. 12. Записані у вікно програми показники вмісту Cd в кормах раціону та органічних відходах корів n=6 та результат – регресійний аналіз між вмістом елемента в кормах раціону і органічних відходах тварин типи годівлі: а – силосно-коренеплодний; б – силосно-сінний; в – силосно-сінажний; г – силосно-сінажно-концентратний

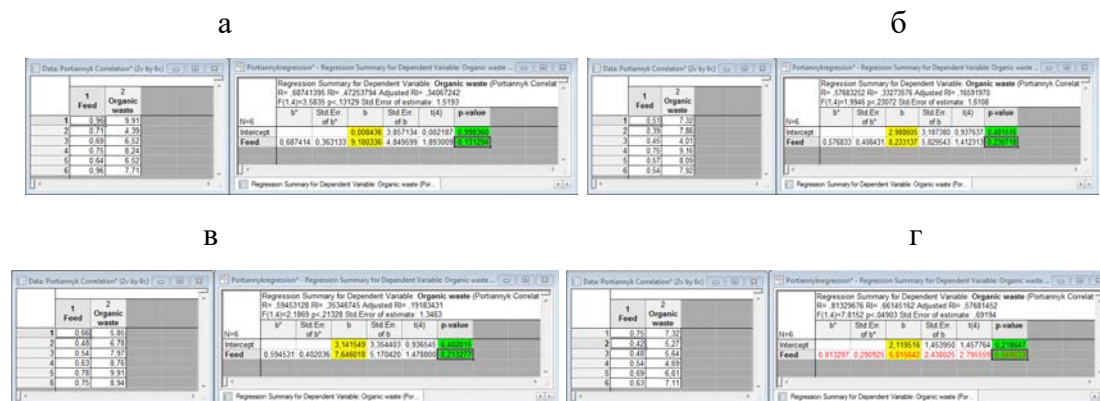


Рис. 13. Записані у вікно програми показники вмісту Pb в кормах раціону та органічних відходах корів n=6 та результат – регресійний аналіз між вмістом елемента в кормах раціону і органічних відходах тварин типи годівлі: а – силосно-коренеплодний; б – силосно-сінний; в – силосно-сінажно-концентратний

вірогідності, котрі становлять $p < 0.05$ є прийнятними для побудови моделі. В нашому випадку за концентрацією Cd $p < 0.045$ (прийнятний) (силосно-коренеплодний тип годівлі); $p < 0.087$ (неприйнятний) (силосно-сінний тип годівлі); $p < 0.277$ (неприйнятний) (силосно-сінажний тип годівлі); $p < 0.105$ (неприйнятний) (силосно-сінажно-концентратний тип годівлі), а по Pb $p < 0.131$ (неприйнятний); $p < 0.231$ (неприйнятний); $p < 0.213$ (неприйнятний); $p < 0.049$ (прийнятний) (силосно-сінажно-концентратний тип годівлі) відповідно.

Нами зроблені відповідні перевірки вірогідності отриманих результатів від застосування побудованих рівнянь регресії на практиці. Залишається лише перевірити побудову прогнозів навівши ряд прикладів по кожному з досліджуваних оксидних важких металів.

По кадмію. Лабораторний аналіз кормів раціону дійних корів встановив концентрацію кадмію в кормах на рівні 30.35 мг/кг, а концентрація в органічних відходах є невідомою. Годівля тварин відбувається за силосно-коренеплодним типом годівлі. Підставляємо даний показник у програму або відповідне рівняння регресії у $y = -0.0365 + 0.0054 \times x$ і отримуємо результат $0.12739 = -0.0365 + 0.0054 \times 30.35$ (рис. 14). Прогнозована концентрація Cd в органічних відходах, котрі будуть вноситися в ґрунт як органічні добрива, становить 0.127 мг/кг. Даний результат узгоджується з фактичними результатами лабораторного аналізу органічних відходів наведених у вихідних табличних даних (рис. 14). Так само перевіряємо

всі інші моделі прогнозу в т.ч. по Pb (рис. 15). Перевіряємо прогноз концентрації важких металів в органічних відходах корів з силосно-сінним типом годівлі. Концентрація полюганта в кормах становить 23.45 мг/кг. $0.325215 = -0.0664 + 0.0167 \times 23.45$ (див. рис. 14). Прогнозована концентрація Cd в органічних відходах, котрі будуть вноситися в ґрунт як органічні добрива, становить 0.325 мг/кг. Даний результат узгоджується з фактичними результатами лабораторного аналізу органічних відходів наведених у вихідних табличних даних (див. рис. 14). Далі перевіряємо прогноз концентрації Cd в органічних відходах корів з силосно-сінажним типом годівлі. Концентрація полюганта в кормах становить 33.27 мг/кг. $0.153069 = -0.0033 + 0.0047 \times 33.27$ (див. рис. 14). Прогнозована концентрація Cd в органічних відходах, котрі будуть вноситися в ґрунт як органічні добрива, становить 0.154 мг/кг. Даний результат узгоджується з фактичними результатами лабораторного аналізу органічних відходів наведених у вихідних табличних даних (див. рис. 14). Перевіряємо прогноз концентрації Cd в органічних відходах корів з силосно-сінажно-концентратним типом годівлі. Концентрація полюганта в кормах становить 43.51 мг/кг. $0.202393 = 0.0153 + 0.0043 \times 43.51$ (див. рис. 14). Прогнозована концентрація Cd в органічних відходах, котрі будуть вноситися в ґрунт як органічні добрива, становить 0.205 мг/кг. Даний результат узгоджується з фактичними результатами лабораторного аналізу органічних відходів наведених у вихідних табличних даних (див. рис. 14).



Рис. 14. Прогнозування концентрації Cd мг/кг в органічних відходах дійних корів за встановленої лабораторним аналізом концентрації поліютанта в кормах

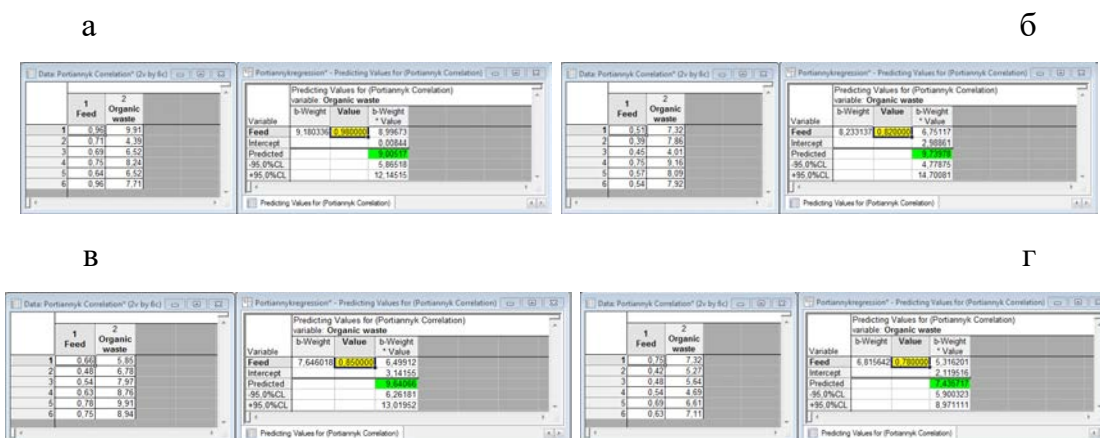


Рис. 15. Прогнозування концентрації Pb мг/кг в органічних відходах дійних корів за встановленої лабораторним аналізом концентрації поліютанта в кормах

По свинцю. Лабораторний аналіз кормів раціону дійних корів встановив концентрацію свинцю в кормах на рівні 0.98 мг/кг, а концентрація в органічних відходах є невідомою. Годівля тварин відбувається за силосно-коренеплодним типом годівлі. Підставляємо даний показник у програму або відповідне рівняння регресії $y = 0.0084 + 9.1803 \times x$ і отримуємо результат $9.005094 = 0.0084 + 9.1803 \times 0.98$ (див. рис. 15). Прогнозована концентрація Pb в органічних відходах, котрі будуть вноситися в ґрунт як органічні добрива, становить 9.01 мг/кг (результат узгоджується) (див. рис. 15). Перевіряємо прогноз концентрації Pb в органічних відходах корів з силосно-сінним типом годівлі. Концентрація поліютанта в кормах становить 0.82 мг/кг. $9.739742 = 2.9886 + 8.2331 \times 0.82$ (див. рис. 15). Прогнозована концентрація Pb в органічних відходах, котрі будуть вноситися в ґрунт

як органічні добрива, становить 9.740 мг/кг (результат узгоджується) (див. рис. 15). Далі перевіряємо прогноз концентрації Pb в органічних відходах корів з силосно-сінажним типом годівлі. Концентрація поліютанта в кормах становить 0.85 мг/кг. $9.41122 = 3.1415 + 7.646 \times 0.82$ (див. рис. 14). Прогнозована концентрація Pb в органічних відходах, котрі будуть вноситися в ґрунт як органічні добрива, становить 9.641 мг/кг (результат узгоджується) (див. рис. 15). Перевіряємо прогноз концентрації Pb в органічних відходах корів з силосно-сінажно-концентратним типом годівлі. Концентрація поліютанта в кормах становить 0.78 мг/кг. $7.435668 = 2.1195 + 6.8156 \times 0.78$ (див. рис. 15). Прогнозована концентрація Pb в органічних відходах, котрі будуть вноситися в ґрунт як органічні добрива, становить 7.436 мг/кг результат узгоджується з фактичними результатами лаборатор-

ного аналізу органічних відходів наведених у вихідних табличних даних (див. рис. 15).

Обговорення

Вченими давно і досить широко застосовуються методи кореляційного та регресійного аналізу отриманих результатів досліджень. При цьому використовуються різні комп'юторні програми та алгоритми аналізу. Важливе значення має не лише аналіз сили кореляційного зв'язку між показниками, а і правильний вибір самих показників. Вчені (Lili et al., 2015) використовували кореляційний аналіз для виявлення співвідношення між важкими металами в морських осадах Гонконгу. При цьому застосовували на першому етапі – рангову кореляцію Спірмена, а потім Пірсона. Затока і гавань (Victoria) були забруднені важкими металами Pb і Cu, що корелювало з забрудненням Cr, Ni та Zn. (Lili et al., 2015) вважають, що ними вперше застосовано подібний аналіз для дослідження забруднення навколишнього середовища, крім того, що такі методи вже широкого застосовувалися в біології, соціології та інформатиці. Важливим є те, що досліджений кореляційний і регресійний аналіз можна застосовувати не лише для морських відкладень, а й у інших екологічних системах, що було зроблено нами. Спочатку ми перевірили кореляційний зв'язок між вмістом токсичних важких металів кадмію та свинцю в кормах і органічних відходах корів за допомогою методу Спірмена (Correlations Spearman), оскільки даний метод рекомендується застосовувати для вибірок ($n < 50$), що в попередніх роботах нами вже розглядалося. Кореляційний аналіз методом Пірсона показав дуже високу кореляційну залежність між досліджуваними показниками по кадмію у корів з силосно-коренеплодним типом годівлі $r = 0.822$ ($p < 0.05$), по свинцю силосно-сінажно-концентратним типом $r = 0.813$ ($p < 0.05$). Високу кореляційну залежність встановлено по Cd у тварин з силосно-сінним типом годівлі $r = 0.748$ ($p < 0.05$) та силосно-сінажно-концентратним $r = 0.722$ ($p < 0.05$), а по Pb лише у тварин з силосно-коренеплодним типом $r = 0.687$ ($p < 0.05$). Середній кореляційний зв'язок за концентрацією Pb був встановлений у корів з силосно-сінним типом годівлі $r = 0.577$ ($p < 0.05$) і силосно-сінажним $r = 0.595$ ($p < 0.05$). Аналіз методом Спірмена встановив в усіх експериментах тільки високий і дуже високий кореляційний зв'язок від $r = 0.66$ до $r = 0.83$ ($p < 0.05$).

Вчені (Boldizar et al., 2017) досліджували біосорбційні характеристики іонів Cd (II) та

Zn (II) з монокомпонентних водних розчинів макрогрибом *Agaricus bisporus*. Початкова концентрація іонів металу, час контакту, початковий pH і температура були параметрами, котрі впливали на біосорбцію. Експериментальні дані проаналізовано за допомогою кінетичних моделей, розраховано різні моделі у лінійній та нелінійній (CMA-ES optimization algorithm) пересії. Коефіцієнти Ленгмюра та Фрейдліха (Langmuir and Freundlich) були розраховані за допомогою лінійної регресії для біосорбції Cd (II) і Zn (II) на біомасі макрогриба *Agaricus bisporus*. Вчені у своїй роботі наводять відповідні графіки, де вказано показник детермінації R^2 та відповідне рівняння регресії (рис. 16), що було зроблено й нами (див. вище). В експерименті дослідників R^2 був дуже високим і становив 97-99% (рис. 16) в нашому дослідженні показник був меншим від 28% (дуже низький) до 68%, але рівняння регресії побудоване в експерименті з силосно-сінажним типом годівлі тварин, де $R^2 = 0.28$ ми рекомендуємо використовувати для прогнозу забруднення важкими металами у виключних ситуаціях (обмежено) з подальшим лабораторним аналізом проб органічних відходів (добрив). В усіх інших типах годівлі R^2 був вище 30% тож рівняння регресії за цим показником є достатньо релевантними. У регресійному аналізі результатів експерименту вчені (Boldizar et al., 2017) враховують також нелінійну регресію. Порівнюючи два методи, дослідники роблять висновок, що фактори закладені в модель у їхньому варіанті, нелінійна регресія є найбільш прийнятним методом, котрий можна використовувати для оцінки параметрів моделі. Отримані параметри моделі, розраховані за допомогою нелінійної регресії, більш релевантні, ніж отримані за допомогою лінійної регресії. В умовах нашої моделі закладено всього два параметри: 1-й концентрація кадмію та свинцю в кормах раціону корів і 2-й концентрація кадмію та свинцю в органічних відходах тварин. Тому перевірка моделей за тестами Kolmogorov-Smirnov and Lilliefors test for normality та Shapiro-Wilk's W test, параметричний кореляційний аналіз Пірсона, побудова діаграм розсіювання, аналіз залишків, оцінка прийнятності моделі за параметром ANOVA і коефіцієнтом детермінації R^2 дозволяє вибрати самі ефективні й максимально точні для прогнозу рівняння регресії. Після зробленого аналізу (Boldizar et al., 2017) приходять висновку, що макрогриб *Agaricus bisporus* можна використовувати

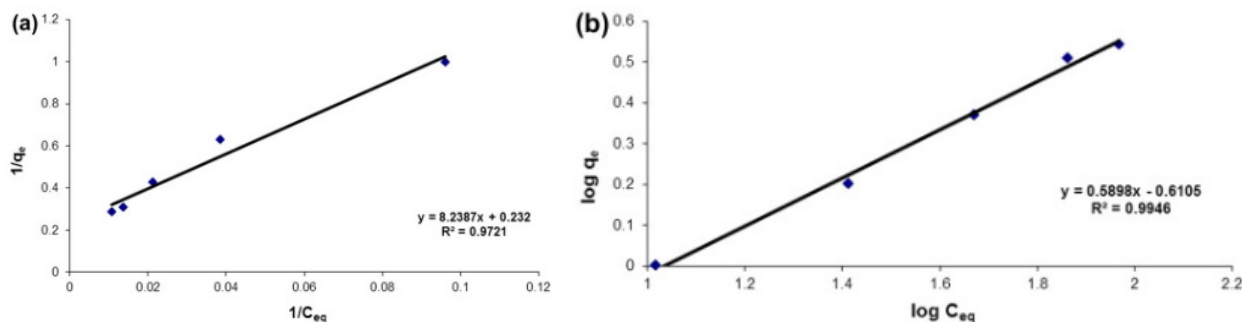


Рис. 16. Графіки Лянгмюра (a) і Фрейдліха (b) у лінійному регресійному аналізі для біосорбції Cd (II) з використанням біомаси *Agaricus bisporus* (Boldizar et al., 2017)

вати як економічно ефективний біосорбент для видалення Cd (II) та Zn (II) із водних синтетичних розчинів. Ми рекомендуємо використовувати побудовані рівняння регресії по концентрації Cd за силосно-коренеплодного типу годівлі корів $y = -0.0365 + 0.0054 \times x$, силосно-сінного $y = -0.0664 + 0.0167 \times x$, силосно-сінажного $y = -0.0033 + 0.0047 \times x$, силосно-сінажно-концентратного типу $y = 0.0153 + 0.0043 \times x$, по Pb $y = 0.0084 + 9.1803 \times x$, $y = 2.9886 + 8.2331 \times x$, $y = 3.1415 + 7.646 \times x$, $y = 2.1195 + 6.8156 \times x$ відповідно, як інструмент для екологічного моніторингу, прогнозування (моделювання) переходу токсичних важких металів в органічні відходи і далі у ґрунт в скотарських господарствах.

Вчені (Covelo et al., 2008) застосовували регресійний аналіз досліджуючи сорбцію частинками ґрунту важких металів Cd, Cr, Cu, Ni, Pb і Zn, що мінімізує їх потрапляння в поверхневі та підземні води, але одночасно створює вірогідність, що зміна ґрунтових умов може призвести до викиду акумульованих токсикантів у ґрунтовий розчин, спричиняючи таким чином забруднення як підземних вод, так і рослин. Поведінка важких металів у ґрунті і токсичний ризик, що вони представляють, значною мірою залежить від їхньої сорбційно-десорбційної рівноваги та динаміки в ґрунтах, де вони акумулюються і від зміни екологічної рівноваги у відповідь на зміну умов навколишнього природного середовища. Множинну лінійну регресію застосовували (Weibin et al., 2022) у дослідженні забруднення важкими металами індустріального парку (рис. 17). Вчені створили метод, котрий поєднує аналіз головних компонентів, геодетектор і множинну лінійну регресію відстані до джерел викидів забруднюючих речовин, котра впливає на рівень забруднення ґрунту. Основні джерела забруднення конкретними

елементами були ідентифіковані вченими за рівняннями регресії.

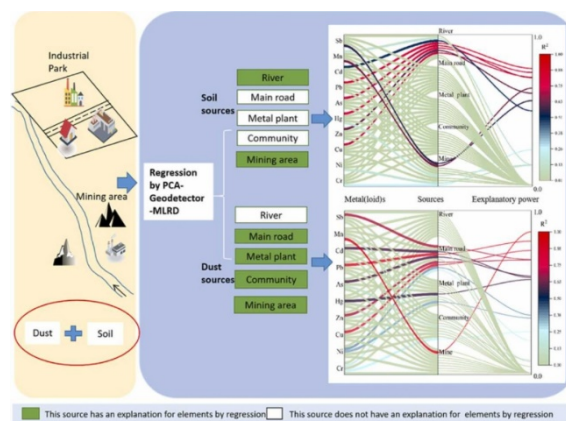


Рис. 17. Концептуальна схема дослідження (Weibin et al., 2022)

Виявлення потенційних джерел забруднення є основою контролю екологічного ризику, а аналіз джерел забруднення важкими металами ґрунту є однією з найважливіших проблем в останні роки (Weibin et al., 2022, Yanxue et al., 2017, Xufeng et al., 2020, Geng et al., 2020)

Ми погоджуємося з вітчизняними вченими (Kozulya et al., 2004), які обґрунтовують важливість дослідження проблеми забруднення навколишнього природного середовища пов'язану з токсичністю важких металів, що здійснюють шкідливий вплив на живі організми, підкреслюючи визначальний показник негативного впливу хімічних речовин концентрацію. Саме концентрацію поллютантів ми заклали і в нашу модель регресії. Найбільш пріоритетними для хіміко-токсикологічного аналізу вчені вказують Pb, Hg, Cd, Cu, Ni, Co, Zn, котрі мають високу токсичність, міграційну здатність, що узгоджується з нашими досліджен-

нями. В ході експерименту ми визначали в кормах і органічних відходах концентрацію міді, цинку, але в даній публікації для аналізу вибрали найбільш екоцидні кадмій та свинець. Поведінка токсикантів в різних природних середовищах обумовлена їх специфічністю і відповідними властивостями такими як токсичність, акумуляція, рухомість, комплексоутворення тощо. Науковці (Kozulya et al., 2004) дослідивши кореляційний зв'язок між вмістом важких металів у ґрунтах різних екосистем при вирішенні задач математичного моделювання в екологічному моніторингу приходять до висновку, що існує тісний зв'язок між накопиченням важких металів у ґрунтах при їх малій міграційній здатності завдяки наявності нерозчинних сполук, до складу яких вони входять і цей факт обумовлено комплексним забрудненням навколишнього середовища, саме техногенними речовинами хімічної природи катіоногени і аніоногени. Встановивши кореляційний зв'язок і отримавши відповідні рівняння регресії вчені за допомогою математичної моделі можуть прогнозувати відповідні екологічні зміни, оцінювати екологічні ризики. Дослідження вчених не лише тісно пов'язані з нашими дослідженнями, але й мають подібну методологію. Досліджені нами органічні відходи тваринництва містять токсичні важкі метали Cd, Pb ін., потрапивши в ґрунт, органічні добрива підвищують його родючість, але одночасно спричиняють акумуляцію поллютантів, котрі можуть утворювати не лише валові, а і рухомі форми токсичних елементів й далі, в залежності від рН ґрунту інших факторів, мігрувати в рослини, які є кормом для сільськогосподарських тварин.

Ми перевірили всі рівняння регресії увівши, в якості прикладу, замість X умовно відому з лабораторного аналізу, концентрацію кадмію чи свинцю в кормах і отримали відповідну прогнозовану концентрацію поллютанта в органічних відходах. Розрахунок провели двома способами. Простим математичним і за допомогою програми STATISTICA версії 10.0, де теж безпосередньо є така функція. Всі рівняння регресії показали прийнятний результат, але більше необхідно застосувати ті моделі, де зафіксована висока вірогідність. Cd – силосно-коренеплодний тип годівлі 0.12739 – математичний розрахунок; 0.127 мг/кг програмний розрахунок (узгоджується з лабораторним аналізом встановленим у пробах органічних відходів на максимальному рівні 0.12 мг/

кг); силосно-сінний тип годівлі 0.325215 – математичний розрахунок; 0.325 мг/кг програмний розрахунок (узгоджується з лабораторним аналізом встановленим у пробах органічних відходів на максимальному рівні 0.22 мг/кг); силосно-сінажний тип годівлі 0.153069 – математичний розрахунок; 0.154 мг/кг програмний розрахунок (узгоджується з лабораторним аналізом встановленим у пробах органічних відходів на максимальному рівні 0.14 мг/кг); силосно-сінажно-концентратний тип годівлі 0.202393 – математичний розрахунок; 0.205 мг/кг програмний розрахунок (узгоджується з лабораторним аналізом встановленим у пробах органічних відходів на максимальному рівні 0.17 мг/кг). Pb силосно-коренеплодний тип годівлі 9.005094 – математичний розрахунок; 9.01 мг/кг програмний розрахунок (узгоджується з лабораторним аналізом встановленим у пробах органічних відходів на максимальному рівні 9.91 мг/кг); силосно-сінний тип годівлі 9.739742 – математичний розрахунок; 9.740 мг/кг програмний розрахунок (узгоджується з лабораторним аналізом встановленим у пробах органічних відходів на максимальному рівні 9.16 мг/кг); силосно-сінажний тип годівлі 9.41122 – математичний розрахунок; 9.641 мг/кг програмний розрахунок (узгоджується з лабораторним аналізом встановленим у пробах органічних відходів на максимальному рівні 9.91 мг/кг); силосно-сінажно-концентратний тип годівлі 7.435668 – математичний розрахунок; 7.436 мг/кг програмний розрахунок (узгоджується з лабораторним аналізом встановленим у пробах органічних відходів на максимальному рівні 7.32 мг/кг).

Побудовані і перевірені нами рівняння регресії допоможуть прогнозувати концентрацію важких металів в органічних відходах тваринництва, а отже і забруднення ґрунту поллютантами в залежності від кількості внесених органічних добрив. В післявоєнний період відбуватиметься відновлення аграрного виробництва в Україні, нарощування поголів'я великої рогатої худоби в т.ч. дійних корів, збільшиться кількість органічних відходів, котрі вноситимуться у великих об'ємах у ґрунт як органічні добрива, тож моделювання навантаження ґрунту небезпечними поллютантами в агроекосистемах матиме важливе значення особливо в умовах ведення органічно-біологічного землеробства, виробництва екологічно безпечної продукції тваринництва і рослинництва.

Висновки

Встановлено високий і дуже високий кореляційний зв'язок між концентрацією важких металів кадмію, свинцю в кормах раціону дійних корів та їх вмістом в органічних відходах у тварин з силосно-коренеплодним типом годівлі і силосно-сінажно-концентратним. Високим був кореляційний зв'язок за вмістом кадмію у корів з силосно-сінним типом годівлі. Для прогнозування концентрації важких металів в органічних відходах, забруднення ґрунту небезпечними токсичними поліюгантами Cd і Pb після внесення органічних відходів як добрив, оцінки ризику та проведення екологічного моніторингу сільськогосподарських угідь скотарських агропідприємств побудовано відповідні рівняння лінійної регресії. Перевірені моделі, котрі рекомендуються до застосування, дадуть максимально точний результат прогнозування по Cd за даними експерименту з силосно-коренеплодним типом годівлі тварин, а по Pb з силосно-сінажно-концентратним типом. Вірогідними також будуть прогнози забруднення при використанні рівнянь регресії отриманих в експерименті з годівлею корів за силосно-сінним та силосно-сінажно-концентрат-

ним типами годівлі. Рівняння регресії розраховані в експерименті з силосно-сінажним типом годівлі тварин можуть використовуватися в екологічному моніторингу з урахуванням більшої похибки, що потребуватиме частішої перевірки в лабораторних умовах концентрації важких металів у пробах органічних відходів (добривах), котрі вноситимуться у ґрунт та у пробах ґрунту.

Рівняння регресії можуть використовуватися для оцінки екологічних ризиків ведення органічно-біологічного землеробства агропідприємств і застосування відповідних заходів зменшення концентрації важких металів в органічних відходах, органічних добривах, котрі вносяться у ґрунт. Зменшення забруднення ґрунту важкими металами забезпечить дотримання вимог діючих Директив, Регламентів ЄС щодо стану ґрунтів і поводження з відходами.

Подальші дослідження спрямовані на проведення кореляційного та регресійного аналізу за іншими важливими у ветеринарній, зоотехнічній і екологічній практиці показниками екологічної безпеки з оцінкою відповідних ризиків ведення галузі скотарства у лісостеповій зоні України.

Список використаної літератури

- Ashraful Abedin Asha S.M., Moshfequr Rahman Md., Tahmid Tayef Md., Reazul Islam Md., Anti S., Szal K. Comprehensive pollution and ecological risk of heavy metals in an industrial region of south-west Bangladesh. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2023. Vol. 20. P. 100899. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100899>.
- Boldizsar N., Carmen M., Andrada M., Cerasella I., Lucian B., Cornelia M. Linear and nonlinear regression analysis for heavy metals removal using *Agaricus bisporus* macrofungus. *Arabian Journal of Chemistry*. 2017. Vol. 10. № 2. P. 3569—3579. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.03.004>.
- Covelo E.F., Matias J.M., Vega F.A., Reigosa M.J., Andrade M.L. A tree regression analysis of factors determining the sorption and retention of heavy metals by soil. *Geoderma*. 2008. Vol. 147. № 1–2. P. 75—85. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.001>.
- European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and Other Scientific Purposes. Strasbourg, 1986. 11 p.
- Geng L., Ying S., Guanlin G., Long Z., Junjie N., Chao Z. Soil pollution characteristics and systemic environmental risk assessment of a large-scale arsenic slag contaminated site. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 251. 119721 p. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119721>.
- Kozulya T.V., Glushkova L.V., Shtitelman Z.V. 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*. 2004. № 4 (29). P. 159—164.
- Kuramshina N.G., Kuramshin E.M., Nikolaeva S.V., Imashev Y.B. The biogeochemical characteristics of the content of heavy metals in soil, plants and animals in different natural areas of Bashkortostan. *Journal of Geochemical Exploration*. 2014. Vol. 144. Part B, P. 237—240. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.01.027>.
- Lili L., Zhiping W., Feng J., Tong Z. Co-occurrence correlations of heavy metals in sediments revealed using network analysis. *Chemosphere*. 2015. Vol. 119. P. 1305—1313. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.01.068>.

Mingtao X., Yan L., Jiayu Y., Kaige L., Yi L., Feng L., Daofu Z., Xiaoqian F., Yu C. Heavy metal contamination risk assessment and correlation analysis of heavy metal contents in soil and crops. *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 278. P. 116911. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116911>.

Sazal K., Meixia Z., Haiyang Z., Aminur R.Md., Chuanxiu L., Mohammad M.R. Distribution, contamination status and source of trace elements in the soil around brick kilns. *Chemosphere*. 2021. Vol. 263. P. 127882. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127882>.

Weibin Z., Xiaoming W., Lingqing W., Mei L., Tongbin C., Gaoquan Gu. Apportionment and location of heavy metal(loid)s pollution sources for soil and dust using the combination of principal component analysis, Geodetector, and multiple linear regression of distance, *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 438. P. 129468. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129468>.

Xufeng F., Zhaohan L., Rui X., Zhouqiao R., Xiaonan Lv. Contamination assessment and source apportionment of heavy metals in agricultural soil through the synthesis of PMF and GeogDetector models. *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 747. P. 141293. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141293>.

Yanxue J., Sihong C., Jianwei L., Yue Y., Yanjiao C., Aichen Z., Hongbin C. Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China. *Chemosphere*. 2017. Vol. 168. P. 1658—1668. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.088>.

Yazhu W., Xuejun D., Lei W. 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. P. 134953. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134953>.

Отримано: 26.01.2024

Прийнято: 21.02.2024