

УДК 502/504.573

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.141.2.28>

РИЗИК ЗАБРУДНЕННЯ МЕРКУРІЄМ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ РОСЛИННИЦТВА В ДНІПРОПЕТРОВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

Кацевич В.В. – к.с.-г.н.,
завідувачка кафедри екології,
Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Ананьєва Т.В. – к.б.н.,
доцентка кафедри екології,
Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Ворошилова Н.В. – к.б.н.,
доцентка кафедри екології,
Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Доценко Л.В. – к.б.н.,
доцентка кафедри екології,
Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Карась О.Г. – к.б.н.,
старша викладачка кафедри екології,
Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Маленко Я.В. – к.б.н.,
доцентка кафедри біології та екології,
Криворізький державний педагогічний університет

Проведено оцінку рівнів забруднення сільськогосподарських ґрунтів і рослинної продукції ртуттю в Дніпропетровській області на 29 моніторингових ділянках, розташованих на чорноземах звичайних і чорноземах південних. Перехід ртуттю з ґрунту в сільськогосподарську продукцію рослинництва досліджували на прикладі зерна пшениці озимої і насіння соняшника. Вміст ртуттю визначали методом атомно-абсорбційної спектрометрії. Щільність розподілу ймовірностей концентрації ртуттю в зразках ґрунту і продукції рослинництва отримали методом статистичного моделювання за законом нормального розподілу. Для проведення статистичного аналізу були сформовані ряди з усіх можливих даних, які були накопичені за два тури обстежень ґрунтів Дніпропетровської області і які мали достатню вірогідність. Для ґрунтів статистичні ряди мали кількість варіант від 2×10^4 до 4×10^4 ; для продукції рослинництва – від 2×10^3 до 4×10^3 . На інтегральній кривій щільності розподілу ймовірностей вмісту ртуттю в ґрунтах виокремлено три компоненти у наступній послідовності: чорнозем звичайний; чорнозем південний; площі, що знаходяться під впливом забруднення. Встановлено, що в зерні пшениці у Дніпропетровській області приблизно до 25 % врожаю вирощено на територіях, забруднених ртуттю, але з перевищенням ГДК – близько 4 % від валового врожаю по області. На інтегральній кривій щільності розподілу ймовірностей вмісту ртуттю в насінні соняшника виявлено чотири компоненти. Статистичний аналіз показав, що частка врожаю соняшника з перевищенням ГДК по ртуттю складає 5,4 % від валового врожаю по області. Біологічні особливості рослин, поряд з агрохімічними властивостями ґрунтів, можна віднести до основних чинників, що впливають на перехід ртуттю з ґрунту в рослини. Неоднакова здатність сільськогосподарських культур до накопичення токсикантів є важливим чинником у регулюванні вмісту важких металів в рослинній продукції.

Ключові слова: ртуть, важкі метали, ґрунти сільськогосподарського призначення, пшениця озима, соняшник.

Katsevich V.V., Ananieva T.V., Voroshilova N.V., Dotsenko L.V., Karas O.G., Malenko Ya.V.
Risk of mercury contamination of agricultural crop production in the Dnipropetrovsk region

An assessment of the mercury contamination levels in agricultural soils and plant products in the Dnipropetrovsk region was carried out at 29 monitoring sites located on ordinary chernozems and southern chernozems. The transfer of mercury from the soil to agricultural plant products was studied using the examples of winter wheat grain and sunflower seeds. The mercury content was determined by atomic absorption spectrometry. The probability density distribution of mercury concentration in soil samples and plant products was obtained by statistical modeling using the normal distribution law. For statistical analysis, series had been formed from all possible data that were accumulated during two rounds of soil surveys in the Dnipropetrovsk region and had sufficient probability. For soils, the statistical series had a number of variants from 2×10^4 to 4×10^4 ; for crop products – from 2×10^3 to 4×10^3 . Three components were distinguished on the integral probability density distribution curve of mercury content in soils in the following sequence: ordinary chernozem; southern chernozem; areas under the influence of pollution. It was found that in Dnipropetrovsk region, approximately up to 25 % of the wheat grain harvest was grown in areas contaminated with mercury, but examples with an excess of the MPC were about 4 % of the total harvest in the region. Four components were found in the integral probability density curve of the mercury content in sunflower seeds. Statistical analysis showed that the share of sunflower harvest with an excess of the MPC for mercury was 5.4 % of the total harvest in the region. Biological features of plants and agrochemical properties of soils can be attributed to the main factors affecting the transfer of mercury from soil to plants. The unequal ability of agricultural crops to accumulate toxicants is an important factor in regulating the content of heavy metals in plant products.

Key words: mercury, heavy metals, agricultural soils, winter wheat, sunflower.

Постановка проблеми. Сучасний екологічний стан сільського господарства в Україні характеризується посиленням процесів забруднення, виснаженістю та деградацією земель, а саме зниженням вмісту гумусу, ущільненням ґрунтів, підвищенням в них вмісту важких металів. Відбуваються несприятливі зміни гідрологічного режиму, які призводять до підтоплення та засолення ґрунтів, опустелювання та заболочення, підвищення мінералізації ґрунтових вод та евтрофікації водоймищ; порушується екологічно допустиме співвідношення площ ріллі [1, 2]. Важкі метали посідають одне з провідних місць серед антропогенних забруднювачів педосфери. Надлишкова їх кількість у різних компонентах біосфери (ґрунті, воді, фітомасі) спричиняє пригнічувальний і навіть токсичний вплив на біоту [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ґрунти є природними накопичувачами важких металів у навколишньому середовищі. Близько 90 % важких металів, що потрапили у довкілля, акумулюються саме ґрунтами [4]. Нагромадження в ґрунті важких металів у великих кількостях можуть змінювати його біологічні властивості, при цьому знижується активність гумусових ферментів, загальна кількість та видовий склад мікроорганізмів тощо. Потрапляючи по харчових ланцюгах з ґрунту в рослини, а потім і в організм тварин і людини, важкі метали можуть спричинювати тяжкі захворювання [5, 6].

У ґрунтах, як правило, знаходиться одночасно кілька важких металів. При цьому найнебезпечнішим для рослин буде елемент, концентрація якого найвища. Забруднення важкими металами контролюють за їх валовим вмістом у ґрунтах і рослинах. При цьому важливо визначати в ґрунтах рухомі форми елементів-забруднювачів [7]. Оцінюючи екотоксикологічний стан ґрунтів за вмістом важких металів, слід зауважити, що проектно-розвідувальні станції хімізації сільського господарства України наводять дані лише для шести токсичних елементів – Zn, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg і визначають як рухомі їхні форми в ґрунті, так і валовий вміст у рослинних зразках [8, 9].

Відомо, що до факторів, які сприяють утриманню важких металів ґрунтом, належать обмінна адсорбція на поверхні глини і гумусу, формування комплексних

сполук з гумусом, поверхнева адсорбція гідратованими оксидами амонію, заліза, марганцю, а також формування нерозчинних сполук, особливо при відновленні. Надходження і накопичення важких металів у рослинах відзначаються біологічними особливостями: різні види рослин мають неоднакову здатність поглинати і накопичувати важкі метали; рослини мають фізіолого-біохімічні механізми, що перешкоджають надходженню важких металів до їх організму, відсутній прямий зв'язок між рівнем забруднення і інтенсивністю надходження важких металів у рослини.

Відомо, що перехід важких металів у рослини збільшується паралельно з підвищенням кислотності ґрунту, оскільки їх сполуки краще розчиняються у кислому середовищі. У підвищеній біодоступності важких металів певну роль може відігравати і коренева мікрофлора. Ґрунтові мікроорганізми можуть переводити нерозчинні форми солей важких металів в розчинні [10].

Потрапляючи з ґрунту в рослинні організми у надмірних кількостях, важкі метали порушують в них обмін речовин, що позначається на рості і розвитку рослин, особливо на початкових етапах. Саме таку особливість використовують при біотестуванні забрудненого ґрунту для встановлення його фітотоксичності [11].

Сполуки ртуті (ртуті) належать до найнебезпечніших забруднювачів біосфери. Великі кількості цих сполук містяться у стоках хімічних підприємств, які виробляють луги (гідроксид натрію) та ацетальдегід. Щороку в результаті спалювання кам'яного вугілля в атмосферу викидається близько 3000 т ртуті. Сполуки ртуті є діючою речовиною багатьох пестицидів, які використовуються для протравлення насіння рослин, а також для виробництва деяких лікарських препаратів, що використовуються в тваринництві [12]. Меркурійорганічні пестициди – це сильнодіючі отруйні речовини чи високотоксичні препарати для теплокровних тварин і людини, їх використовують обмежено – лише для оброблення насіння в боротьбі з бактеріальними і грибовими захворюваннями.

У ґрунті сполуки ртуті містяться у вигляді менш токсичного меркурію сульфуристого або можуть вноситися в нього з протравленим насінням (гранозан, агрозан, агропол, меркурігексан та ін.). У воді сполуки ртуті піддаються біотрансформації за участю бактерій і зоопланктону з наступним їх накопиченням в організмах риб у вигляді метилмеркурію, який дуже токсичний, діє на центральну нервову систему, нирки, печінку та інші органи травлення [13].

Токсикологічна небезпека меркурію виражається у взаємодії з SH-групами білків, блокуючи їх меркурій змінює біологічні властивості тканинних білків та інактивує гідролітичні і окисні ферменти. Меркурій, який проникнув у клітину, може включатись в структуру ДНК, що позначається на спадковості [14].

Постановка завдання. Метою роботи було визначення закономірностей забруднення меркурієм зернової продукції пшениці та насіння сояшиника в залежності від його міграційної здатності і біодоступності, концентрацій рухомих форм у ґрунтах моніторингових ділянок Дніпропетровської області.

Експериментальні дані аналізували методами математичної статистики з використанням виділеного тренду функції щільності розподілу ймовірностей, яка дозволяє розраховувати залежність між вмістом меркурію в пробах ґрунту і рослинного матеріалу [15, 16]. Для оцінки рівня забруднення ґрунтів і сільськогосподарських рослин важкими металами на території Дніпропетровської області було вибрано 29 моніторингових ділянок, які розташовані на двох типах ґрунтів – чорноземах звичайних і чорноземах південних [17]. Зразки ґрунту відбирали з ґрунтового-рослинного шару 0–5 см. Перехід меркурію з ґрунту досліджували

на прикладі поширених видів сільськогосподарської рослинної продукції – зерні пшениці та насінні соняшника. Вміст ртуті в рослинних зразках визначали в зольних розчинах. Мінералізацію рослинних зразків проводили методом сухого озолення. Вміст ртуті визначали методом атомно-абсорбційної спектроскопії на спектрофотометрі С115м¹ (Україна)

Щільність розподілу ймовірностей концентрації ртуті у ґрунтах і продукції рослинництва визначали методом статистичного моделювання за логнормальним законом розподілу [15, 16]. Варіанти сформованих рядів розподіляли по визначених діапазонах у відповідності до традиційного розподілу і за отриманими ймовірностями будували криві розподілу. Аналізували наявність кореляції між факторами, що спричиняють вплив на взаємозв'язок вмісту ртуті в ґрунті і сільськогосподарській рослинній продукції [3].

З метою отримання більш деталізованої інформації для аналізу був застосований статистично-ймовірнісний метод, згідно якого аналіз фактичного матеріалу проводили на основі принципів математичної статистики з використанням виділеного тренду функції щільності розподілу ймовірностей [15, 16]. Це дозволяє розраховувати ймовірність вмісту важких металів в пробі ґрунту або рослинного матеріалу, виокремити підгрупи за ступенем забруднення з інтегрального статистичного ряду, а також встановити відносний вміст (відсоток) цих підгруп, які орієнтовані на відповідні площі земель сільськогосподарського призначення.

Для цього були сформовані статистичні ряди з усіх можливих даних, які були накопичені за два тури обстежень ґрунтів Дніпропетровської області і які мали достатню вірогідність. Для ґрунтів статистичні ряди мали кількість варіантів від 2×10^4 до 4×10^4 ; для продукції рослинництва – від 2×10^3 до 4×10^3 .

У подальшому використовували метод виділення гаусіан з інтегрального (сумарного) розподілу щільності ймовірностей відповідного статистичного ряду. Для цього усі значення вибірки, що відповідали діапазону від мінімального до максимального значення, розділяли на 300 інтервалів. За кількістю значень вмісту ртуті, які потрапляли до того чи іншого інтервалу, будували інтегральний розподіл щільності ймовірностей P у межах від мінімального до максимального значення.

На експериментальних кривих щільності розподілу ймовірностей виділяли явно виражені ділянки гаусіан (з боку мінімальних значень), логарифмували і апроксимували їх квадратичною функцією. Потім враховували те, що

$$\ln f(K_i) = a_2 K_i^2 + a_1 K_i + a_0$$

$$a_0 = \left(\ln A - \frac{1}{2\sigma^2} \bar{K}^2 \right) \quad a_1 = \frac{I}{\sigma^2} \quad a_2 = -\frac{1}{2\sigma^2}$$

де K – поточне значення; $\bar{K}$ – середнє арифметичне значення; σ – середнє квадратичне відхилення; A – амплітуда (максимальне значення ймовірностей знаходження значень значенням) і логарифмічне уявлення функції нормального розподілу має таку ж квадратичну залежність:

$$f(K) = A e^{-\frac{(\bar{K}-K)^2}{2\sigma^2}}$$

$$\ln f(K_i) = \ln A - \frac{1}{2\sigma^2} (K_i - \bar{K})^2 = -\frac{1}{2\sigma^2} K_i^2 + \frac{\bar{K} K_i}{\sigma^2} + \left(\ln A - \frac{1}{2\sigma^2} \bar{K}^2 \right)$$

За значеннями коефіцієнтів a_0, a_1, a_2 знаходили A, σ, i будували відповідну гаусіану. Вилучивши дану складову із сумарної складової, будували наступну гаусіану. Визначивши складові теоретичного розподілу, додавали їх і отримували сумарні криві теоретичного розподілу.

Кожна гаусіана відповідала певній підгрупі забруднених ґрунтів у структурі границь розподілу. Це свідчить про можливість ідентифікації основних підгруп за максимумами гаусіан теоретичних кривих, отриманих з експериментальних розподілів. Для визначення відносного вмісту цих підгруп у структурі границь розподілу вимірювали частку площі відповідної гаусіани по відношенню до сумарної площі усіх гаусіан, яка дорівнювала одиниці – 100 %.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сполуки ртуті заслуговують на особливу увагу в аграрному виробництві, оскільки вони належать до найбільш небезпечних забруднювачів біосфери. Збільшенню концентрації ртуті у ґрунті сприяють ртутіорганічні пестициди [12]. Для опрацювання експериментальних даних щодо вмісту ртуті у досліджуваних зразках ґрунту, зерні пшениці та насінні соняшника застосовували аналітичний підхід. В подальшому виявлені компоненти перевіряли за допомогою кореляційного аналізу на наявність достовірної залежності між ними, що свідчило про закономірність міграції ртуті в системах ґрунт–рослина залежно від конкретних чинників – типу ґрунту, місцевих кліматичних умов, сільськогосподарської культури, особливостей агротехніки. Розраховували інтегральні коефіцієнти накопичення з відповідним рівнем варіабельності.

Криві щільності розподілу ймовірностей вмісту ртуті в ґрунті та їх складові компоненти наведені на рис. 1–2.

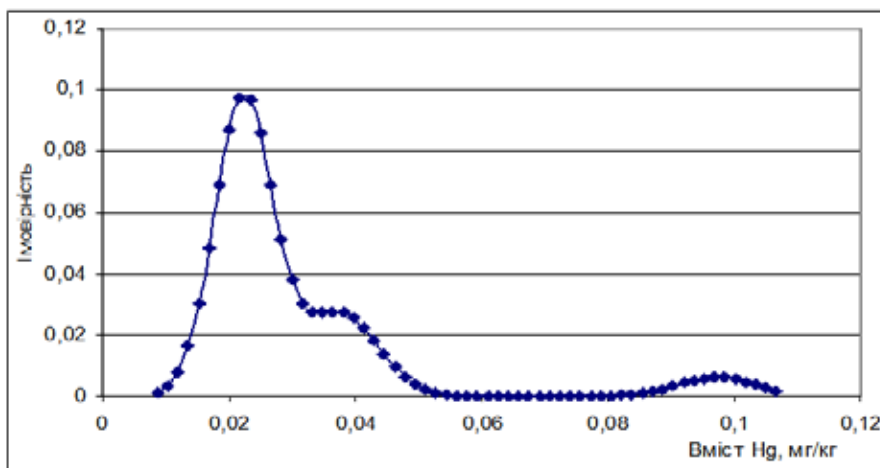


Рис. 1. Інтегральна крива щільності розподілу ймовірностей вмісту ртуті у ґрунтах

В цілому компоненти, пов'язані з антропогенним забрудненням, невеликі і в сумарній площі угідь області складають 4–6 %.

Як показали дослідження, в зонах, що прилягають до безпосередніх джерел забруднення, найбільший внесок у формування забруднених територій дають теплові електростанції: Зеленодольська і Придніпровська ТЕЦ – 42 %, а також

металургійні підприємства і особливо видобувні підприємства рідкоземельних металів [19].

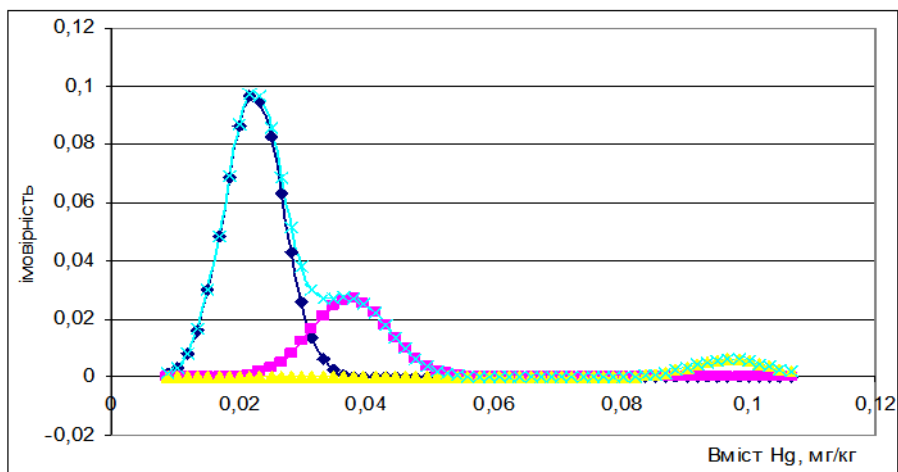


Рис. 2. Складові компоненти інтегральної кривої щільності розподілу ймовірностей вмісту ртуті у ґрунтах

Результати математичного аналізу вмісту ртуті у середньостатистичному врожаї пшениці озимої представлені на рис. 3–4.

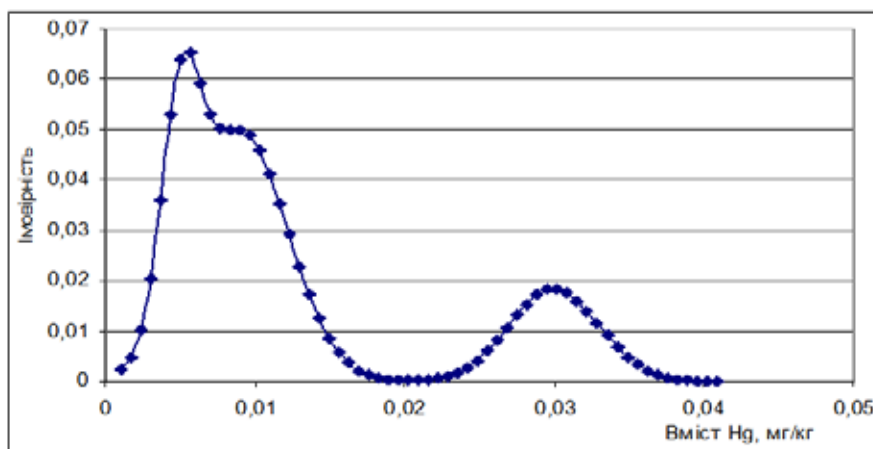


Рис. 3. Інтегральна крива щільності розподілу ймовірностей вмісту ртуті у зерні пшениці

На інтегральній кривій щільності розподілу ймовірностей вмісту ртуті у зерні пшениці виділено три компоненти з відповідними середніми значеннями: $0,005 \pm 0,0013$ мг/кг (20,0 %); $0,009 \pm 0,0032$ мг/кг (59,3 %); $0,030 \pm 0,0030$ мг/кг (20,6 %).

Як показують наведені дані, на відносно забруднених меркурієм територіях формується приблизно 20 % урожаю, але з перевищенням ГДК – близько 4,0 % від валового урожаю по області.

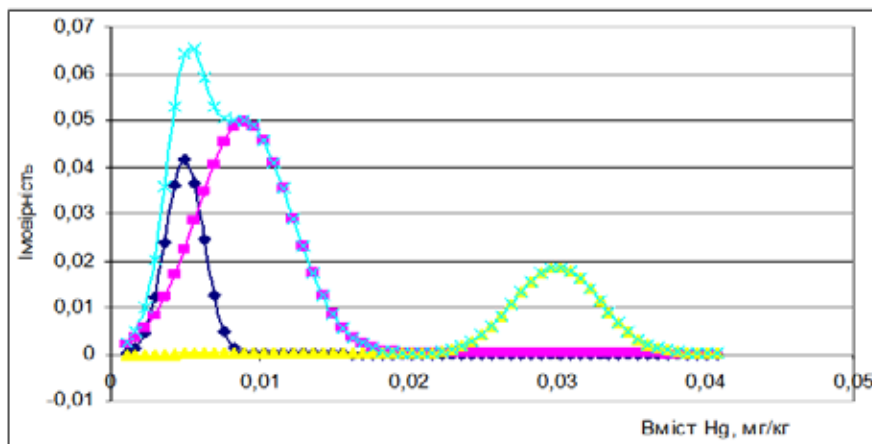


Рис. 4. Складові компоненти інтегральної кривої щільності розподілу ймовірностей вмісту меркурію у зерні пшениці

На інтегральній кривій щільності розподілу ймовірностей вмісту меркурію в насінні соняшника виділено чотири компоненти з відповідними середніми значеннями (рис. 5–6): $0,005 \pm 0,0019$ мг/кг (22,7 %); $0,017 \pm 0,0043$ мг/кг (40,9 %); $0,025 \pm 0,0028$ мг/кг (20,6 %); $0,030 \pm 0,0030$ мг/кг (15,8 %).

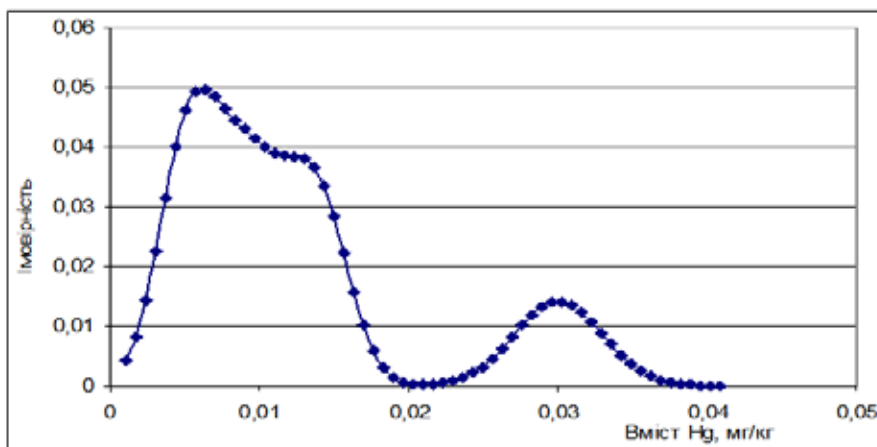


Рис. 5. Інтегральна крива щільності розподілу ймовірностей вмісту меркурію в насінні соняшника

Отримані для зерна соняшника співвідношення наближаються до отриманих характеристик по зерну пшениці, але спостерігається зсув до більш високих значень, а також дещо нижчий відсоток формування урожаю на умовно забруднених

грунтах (близько 16 %). Втім, результати статистичного аналізу показали достатньо високий відсоток перевищення ГДК по вмісту ртуті в насінні соняшника – 5,4 % від валового урожаю по області.

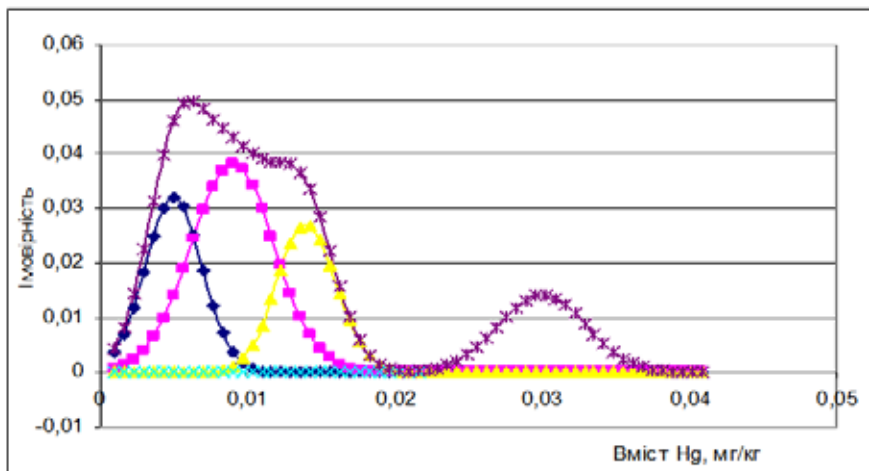


Рис. 6. Складові компоненти інтегральної кривої щільності розподілу ймовірностей вмісту ртуті в насінні соняшника

Для оцінки ступеня забруднення сільськогосподарських культур, зниження їх поживної цінності і розробки заходів спрямованих на отримання екологічно чистої продукції, зростає необхідність вивчення особливостей надходження і накопичення ртуті у рослинах. Основним показником при вирощуванні сільськогосподарських культур є врожайність та якість вирощеної продукції. Урожай – це інтегральний показник, який складається з ряду елементів. Висока фітотоксичність важких металів, особливо ртуті, як встановлено чисельними дослідженнями, знижує продуктивність рослин. Зміни будь якого з елементів структури врожаю відбиваються і на валовому врожаї [4, 14]. Екологічно безпечний урожай зернових колосових культур формується за вмістом у ґрунті важких металів на рівні 1–2 кларків, або вдвічі меншому за максимально допустимий рівень [2, 19].

Ґрунти як основа екотопу в значній мірі визначають макро- і мікроелементний склад рослин, які на ньому вирощуються. При підвищенні вмісту важких металів у ґрунті знижується його загальна біологічна активність, і це різко відбивається на рості і розвитку рослин, причому різні рослини реагують на надлишок металів по-різному. Дослідження показали, що метали розподіляються по органах рослин нерівномірно. Відомо, що в коренях сполуки важких металів частково переводяться в більш мобільну хімічну форму, після чого вони накопичуються у молодих пагонах. Дія важких металів на рослинний організм залежить від природи елемента, вмісту його в оточуючому середовищі, характеру ґрунту, форм хімічної сполуки, біохімічних особливостей різних видів організмів, їх віком, формою розвитку тощо [20].

Висновок. Запропонований статистичний аналіз з використанням функції щільності розподілу ймовірностей для експериментальних даних вмісту важких металів, а саме ртуті в ґрунті і сільськогосподарських культурах відображає

їх вміст у ґрунтах та накопичення у репродуктивних органах рослин. Результати статистичного аналізу показали високі відсотки перевищення ГДК по ртуті – 4,0 % для зерна пшениці і 5,4 % для насіння соняшника від валового урожаю по області.

Відмічено, що транспортування ртуті із коренів у надземну частину рослин більш активно проходило для соняшника ніж для пшениці озимої. Коренева система рослин виконує захисну функцію, яка є перешкодою для транспортування важких металів у надземну частину рослин та накопичення ртуті в репродуктивних органах. Біологічні особливості рослин, поряд з агрохімічними властивостями ґрунтів, можна віднести до основних факторів, що впливають на перехід ртуті з ґрунту в рослини. Неоднакова здатність сільськогосподарських культур до накопичення токсикантів є важливим фактором у регулюванні вмісту важких металів в рослинній продукції. За рахунок правильного підбору культур можна регулювати зменшення накопичення ртуті в сільськогосподарській продукції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Zhang, Q., Yu, R., Fu, S. et al. Spatial heterogeneity of heavy metal contamination in soils and plants in Hefei, China. *Scientific Reports*. 2019, vol. 9, p. 1049. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36582-y>.
2. Наукові основи організації екологічно безпечного землекористування / Фурдичко О. І., Дребот О. І., Добряк О. С. та ін. *Збалансоване природокористування*. 2021, № 2. С. 5–11. DOI: 10.33730/2310-4678.2.2021.237991
3. Хомутинін Ю. В., Іванов Ю. О., Кириченко В. К. Алгоритм прийняття рішень про реабілітацію земель сільськогосподарського призначення, забруднених важкими природними радіонуклідами. *Ядерна фізика та енергетика*. 2013, Т. 14, № 2. С. 183–193. <https://doi.org/10.15407/jnpae2013.02.183>
4. Важкі метали: надходження в ґрунти, транслокація у рослинах та екологічна безпека / Гришко В. М., Сищиків, Д. В., Піскова О. М. та ін. Донецьк: Донбас, 2012. 304 с.
5. Мазур В.А., Ткачук О.П., Яковець Л.А. Екологічна безпека зернової та зернобобової продукції. Вінниця: ВНАУ, 2020. 442 с.
6. Chorna V. I., Voroshylova N. V., Syrovatko V. A. Cadmium distribution in soils of Dnipropetrovsk oblast and its accumulation in crop production. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2018. Vol. 8(1). P. 910–917. DOI: 10.15421/2018_293
7. Asare M. O., Száková J. and Tlustoš P. Mechanisms of As, Cd, Pb, and Zn hyperaccumulation by plants and their effects on soil microbiome in the rhizosphere. *Frontiers in Environmental Science*. 2023, vol. 11, p. 1157415. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1157415
8. Про затвердження Гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті. Наказ Міністерства охорони здоров'я України України від 14.07.2020 р. № 1595.
9. Максимально допустимі рівні окремих забруднюючих речовин у харчових продуктах. Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 13.05.2013 р. № 368
10. Тихонова О. М., Кирильчук К.С., Шаповал В.П. Дослідження валового вмісту нікелю та арсену у смугах відведення автошляхів м. Суми. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. 2020, вип. 2(40). С. 62–71.
11. Garbisu C., Alkorta I. Basic concepts on heavy metal soil bioremediation. *The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection*. 2003, vol. 3, № 1. P. 58–66.
12. Сучасні екологічно чисті технології знезараження непридатних пестицидів. Монографія. / Петрук В. Г., Яворська О. Г., Васильківський І. В. та ін. Під ред. Петрука В.Г. Вінниця: Універсум-Вінниця, 2003. 254 с.

13. Migration of heavy metal mobile forms into the plant vegetative mass under anthropogenic load / Butsiak H. A., Butsiak V. I., Gutyj B. V. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2021, vol. 11(1). P. 239-343
 14. Metal toxicity in plants: perception, signaling and remediation. Edited by D. K. Gupta and L. M. Sandiolo. Heidelberg: Springer, 2012. 264 p.
 15. Blitzstein J. K. and Hwang J. Introduction to Probability. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2015.
 16. DeGroot M. H. and Schervish M. J. Probability and Statistics. Ed. 4th. Addison-Wesley, 2012. 893 p.
 17. Чорна В. І., Ананьєва Т. В. Сучасний радіоекологічний стан сільсько-господарських ґрунтів і зернової продукції у Дніпропетровській області України. *Achievements of Ukraine and the EU in ecology, biology, chemistry, geography and agricultural sciences. Col. Monograph*. Lublin, Riga: "Baltija Publishing", 2021. P. 348–363.
 18. Hall J. L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany*. 2002, vol. 53, no. 366. P. 1–11. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.366.1>
 19. Agroecological soil status in agroecosystems / Pinchuk V., Symochko L., Palapa N. et al. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES)*. 2021, vol. 11 (1). P. 1–12. DOI:10.31407/ijeess11.101.
 20. Williams L. E., Pittman G. K., Hall J. L. Emerging mechanisms for heavy metal transport in plants. *Biochem. and Biophys. Acta*. 2009, № 77803. P. 1–23.
-