

УДК 543.06:[615.9:561.28]:633.34]339.564-049.5

ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА ЛАБОРАТОРНОГО КОНТРОЛЮ МІКОТОКСИНІВ  
У СОЇ ЯК ЕЛЕМЕНТ ГАРАНТУВАННЯ БЕЗПЕЧНОСТІ ЕКСПОРТУ*Каратєєва О. І.<sup>1</sup>, к.с.-г.н., доцентка*  
<https://orcid.org/0000-0002-0652-1240>*Юлевич О. І.<sup>1</sup>, к.т.н., доцентка*  
<https://orcid.org/0000-0003-1594-0700>*Люта І. М.<sup>1</sup>, асистентка*  
<https://orcid.org/0000-0002-1672-2337>*Бодюл А. С.<sup>2</sup>, фахівець хіміко-токсикологічного відділу*  
<https://orcid.org/0009-0003-1469-2757><sup>1</sup>Кафедра біотехнології та біоінженерії

Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв, Україна

<sup>2</sup>Миколаївська регіональна державна лабораторія Держпродспоживслужби України,  
м. Миколаїв, Україна<https://doi.org/10.31073/foodresources2026-26-19>

Надійшла 27.05.2026. Прийнята після рецензування 07.06.2026. Опублікована 30.06.2026

Ліцензія CC BY-NC-ND 4.0

**Предмет.** Контамінація сільськогосподарської продукції мікотоксинами є одним із ключових факторів ризику для безпечності харчових продуктів, здоров'я споживачів та стабільності міжнародної торгівлі. Наявність навіть слідових концентрацій мікотоксинів може призводити до економічних втрат, зниження конкурентоспроможності продукції та обмеження експортного потенціалу. **Мета.** Оцінити ефективність інтегрованої системи лабораторного контролю мікотоксинів у сої експортного призначення та її відповідність вимогам безпечності ЄС. **Методи.** У дослідженні застосовано інтегрований комплекс методів, що включав QuEChERS-пробопідготовку з дисперсною мікро-SPE та імуноафінним очищенням AFLAOCHRAPREP, біомаркерний скринінг за вмістом ергостеролу методом ІФА, а також кількісне визначення AFB1, DON, ZEA та T-2 токсину методом ВЕРХ-УФ. **Результати.** Встановлено значну варіабельність рівнів грибової контамінації за показниками ергостеролу. Найнижчі значення відповідали низькому рівню грибного обсіменіння, тоді як у частині зразків виявлено помірний рівень контамінації, що свідчило про потенційний ризик накопичення мікотоксинів. У 66,7% досліджених проб виявлено слідові концентрації AFB1, DON, ZEA та T-2 токсину, які не перевищували регламентованих норм ЄС. Встановлено кореляцію між підвищенням вмістом ергостеролу та наявністю мікотоксинів, що підтверджує доцільність використання біомаркерного аналізу як ефективного скринінгового інструменту. Отримані результати підтвердили ефективність інтегрованого підходу до контролю мікотоксинів у сої, який поєднує скринінговий та підтверджувальний етапи аналізу. Запропонована система забезпечує високу аналітичну чутливість, достовірність результатів, економічну доцільність і відповідність міжнародним вимогам безпечності. **Сфера застосування результатів.** Результати дослідження можуть бути використані у практиці державних і приватних лабораторій, системах експортного контролю та моніторингу безпечності харчової сировини.

**Ключові слова:** мікотоксини, ко-контамінація, ергостерол, ВЕРХ-УФINTEGRATED SYSTEM OF LABORATORY CONTROL OF MYCOTOXINS IN SOYBEAN  
AS AN ELEMENT OF GUARANTEEING EXPORT SAFETY*Olena Karatieieva<sup>1</sup>, PhD, Agricultural, Associate Professor,*  
<https://orcid.org/0000-0002-0652-1240>*Olena Yulevich<sup>1</sup>, PhD, Engineering, Associate Professor,*  
<https://orcid.org/0000-0003-1594-0700>*Iryna Liuta<sup>1</sup>, Assistant,*  
<https://orcid.org/0000-0002-1672-2337>*Anastasiia Bodiul<sup>2</sup>, specialist of the chemical and toxicological department,*  
<https://orcid.org/0009-0003-1469-2757>

<sup>1</sup>Department of Biotechnology and Bioengineering  
Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv, Ukraine

<sup>2</sup>Mykolaiv Regional State Laboratory of the State Service for Food and Consumer Protection of Ukraine,  
Mykolaiv, Ukraine

**Subject.** *Mycotoxin contamination of agricultural products is one of the key risk factors for food safety, consumer health, and the stability of international trade. Even trace concentrations of mycotoxins can lead to economic losses, reduced product competitiveness, and limitations on export potential. Objective.* To evaluate the effectiveness of an integrated laboratory control system for mycotoxins in soybeans intended for export and its compliance with EU safety requirements. **Methods.** *The study employed an integrated set of methods, including QuEChERS sample preparation with dispersive micro-SPE and AFLAOCHRAPREP immunoaffinity purification, biomarker screening for ergosterol content by ELISA, as well as quantitative determination of AFB1, DON, ZEA, and T-2 toxin by HPLC-UV. Results.* Significant variability in fungal contamination levels was observed based on ergosterol levels. The lowest values corresponded to low levels of fungal contamination, while moderate contamination levels were detected in some samples, indicating a potential risk of mycotoxin accumulation. Trace concentrations of AFB1, DON, ZEA, and T-2 toxin were detected in 66.7% of the samples tested, none of which exceeded EU regulatory limits. A correlation was established between elevated ergosterol content and the presence of mycotoxins, confirming the feasibility of using biomarker analysis as an effective screening tool. The results obtained confirmed the effectiveness of an integrated approach to mycotoxin control in soybeans, which combines screening and confirmatory analysis stages. The proposed system ensures high analytical sensitivity, reliable results, cost-effectiveness, and compliance with international safety requirements. **Scope of results.** The research results can be used in the practice of public and private laboratories, export control systems, and food safety monitoring of raw materials.

**Keywords:** *mycotoxins, co-contamination, ergosterol, HPLC-UV*

**Постановка проблеми.** Корми для тварин та харчові продукти відіграють важливу роль у світовій харчовій промисловості, сприяючи безпечному виробництву продуктів харчування тваринного походження по всьому світу. Кормова промисловість є невід'ємною частиною харчового ланцюга, вона генерує дохід та економічну стійкість. Безпека кормів є передумовою безпеки харчових продуктів та здоров'я людини, а також вимогою добробуту та здоров'я тварин; вона визнана спільною цінністю та відповідальністю на всіх етапах виробництва [1].

Хоча можна використовувати низку профілактичних методів але запобігти забрудненню цвілью та мікотоксинами практично неможливо. Загальновизнано, що мікотоксини класифікуються як хімічні або біологічні небезпеки; тому слід впроваджувати ефективні методи контролю якості, такі як HACCP та GMP, включаючи контроль мікотоксинів. Виробникам необхідно запровадити комплексну програму управління мікотоксинами, щоб мінімізувати ці ризики вздовж усього ланцюга постачання кормів для тварин. Управління мікотоксинами є системним і охоплює всі етапи ланцюга постачання кормів, починаючи від виробництва сировини до годівлі на фермі: фаза вирощування культур [4].

У сучасних умовах глобалізації аграрних ринків особливого значення набуває забезпечення безпечності експортно орієнтованої продукції, зокрема сої. Україна є одним із провідних експортерів цієї культури до країн Європейського Союзу, що зумовлює необхідність дотримання жорстких вимог щодо вмісту небезпечних контамінантів, серед яких провідне місце займають мікотоксини. Ці вторинні метаболіти мікроскопічних грибів характеризуються вираженими токсикологічними властивостями, включаючи гепатотоксичну, імуносупресивну та канцерогенну дію, що становить загрозу для здоров'я людини і тварин [3, 14].

Найбільш релевантними для сої є *Aflatoxin B1* (AFB1), *Deoxynivalenol* (DON), *Zearalenone* (ZEA) та *T-2 toxin* (T-2), які продукуються грибами родів *Aspergillus* та *Fusarium*. Рівні контамінації сої зазначеними токсинами залежать від кліматичних умов, агротехнологій, а також умов зберігання і транспортування продукції [10]. Явище ко-контамінації, що характеризується одночасною присутністю кількох мікотоксинів у межах одного зразка,

розглядається як суттєвий фактор ризику, оскільки може зумовлювати адитивні або синергічні токсичні ефекти та ускладнювати процедури їх кількісної оцінки [20].

Наявність мікотоксинів у експортних партіях сої є однією з ключових причин невідповідності продукції вимогам Європейського Союзу та може призводити до її відхилення у міжнародній торгівлі. Водночас важливу роль у виявленні таких випадків відіграє система RASFF, що забезпечує оперативний моніторинг і обмін інформацією щодо небезпечних харчових продуктів і кормів. Варто зазначити, що потенційне виявлення AFB1, DON, ZEA та T-2 у слідових концентраціях в експортній сої свідчить про ймовірну присутність інших мікотоксинів, які не були виявлені.

Традиційні підходи до визначення мікотоксинів, як правило, ґрунтуються на застосуванні швидких скринінгових методів та високоспецифічних підтверджувальних аналітичних технологій. Водночас зростання варіабельності та складності контамінаційних профілів обумовлює доцільність впровадження інтегрованих систем лабораторного контролю, що поєднують кілька рівнів аналітичного визначення в межах єдиної методологічної схеми, що і викликало наш інтерес у даному напрямі досліджень.

**Метою** даного дослідження є наукове обґрунтування інтегрованої системи лабораторного контролю мікотоксинів у сої експортного призначення, а також її експериментальна оцінка з урахуванням рівнів і характеру ко-контамінації та відповідності вимогам безпечності Європейського Союзу.

**Матеріали та методи.** Предмет досліджень поетапна інтеграція скринінгових і підтверджувальних методів у межах єдиної аналітичної стратегії.

У ході досліджень було проаналізовано 12 експортних партій сої із застосуванням інтегрованого поетапного підходу.

Ключовим етапом забезпечення аналітичної достовірності є пробопідготовка, оскільки складна матриця сої, багата на білки, ліпіди та фосфоліпіди, може зумовлювати виражені матричні ефекти. У цьому контексті методика QuEChERS (Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged and Safe) є оптимальним підходом для мультианалітного визначення мікотоксинів, оскільки поєднує високу ефективність екстракції з мінімізацією супутніх коекстрактивних компонентів. Сумісність QuEChERS із BEPX-методами забезпечує належну відтворюваність і точність кількісного визначення цільових аналітів. Використання дисперсної мікро-SPE дозволяє селективно видаляти ліпофільні домішки та пігменти, знижуючи інтерференцію при подальшому хроматографічному аналізі. Також було визначено, що додаткове застосування імуноафінного очищення AFLAOCHRAPREP, при визначенні AFB1 підвищує селективність методу та ефективність детекції низьких концентрацій мікотоксину у складних харчових матрицях [8, 12].

Пробопідготовку зразків сої для визначення мікотоксинів здійснювали наступним чином: із кожного гомогенізованого зразка відбирали 10 г ( $\pm 0,01$  г), потім екстрагували сумішшю ACN:H<sub>2</sub>O (80:20) із додаванням 0,1% оцтової кислоти для ефективного вилугування полярних і неполярних мікотоксинів. Екстракцію проводили шляхом інтенсивного шейкування протягом ~30 хв при кімнатній температурі. Потім пробу центрифугували при 4000 об/хв протягом 10 хв для відділення твердої фази. Супернатант фільтрували через PPT-фільтр 0,45  $\mu$ m. Подальше екстрагування проводилося за участі дисперсної мікро-SPE QuEChERS та твердофазної екстракції на колонках імуноафінного очищення [8, 9].

Для якісного аналізу виявлення контамінації застосовували біомаркерний аналіз за вмістом ергостеролу – специфічного стеролу клітинних мембран грибів, відсутнього у рослинних тканинах, що зумовлює його високу селективність як індикатора грибної біомаси. Накопичення ергостеролу корелює з розвитком мікроміцетів і може передувати утворенню мікотоксинів, що дозволяє виявляти приховану контамінацію навіть за відсутності візуальних ознак ураження [2].

Визначення ергостеролу методом ІФА ґрунтувалося на специфічній взаємодії антигену з антитілами до ергостеролу з подальшим ферментативним утворенням комплексу, інтенсивність забарвлення якого залежала від концентрації біомаркера у досліджуваній пробі. Формування кольорової реакції відбувалося за участі пероксидази хрому (HRP) та хромогенного субстрату тетраметилбензидину (ТМВ): після зв'язування комплексу антиген–антитіло фермент каталізував окиснення ТМВ з утворенням синього забарвлення, яке після внесення стоп-реагенту переходило у жовте. Кількісну оцінку вмісту ергостеролу проводили спектрофотометрично за показниками оптичної густини з подальшим порівнянням отриманих значень із калібрувальною залежністю стандартних розчинів. Інтенсивність забарвлення прямо корелювала з концентрацією ергостеролу у зразку [7].

Оцінювання ступеня контамінації проводили відповідно до встановлених порогових значень вмісту ергостеролу: концентрації менше 5 мкг/г інтерпретували як низький рівень контамінації, у межах 5–10 мкг/г – як помірний рівень, тоді як значення, що перевищують 10 мкг/г, свідчили про високий рівень контамінації [13].

Кількісне визначення мікотоксинів здійснювали методом ВЕРХ-УФ з використанням системи SHIMADZU LC-600, оснащеної детектором UV-1000 Spectra System. Хроматографічне розділення проводили на зворотно-фазовій колонці типу C18 (150–250 × 4,6 мм, розмір частинок 5 мкм). В якості рухомих фаз застосовувались бінарні системи, специфічні для кожного досліджуваного мікотоксину. швидкість потоку становила 1,0 мл/хв для DON та ZEA, 0,5 мл/хв для AFB1 та T-2, об'єм інжекції – 20 мкл. Детектування проводили в УФ-діапазоні з вибором оптимальних довжин хвиль для кожного аналіту. Ідентифікацію здійснювали за часом утримання шляхом порівняння зі стандартними зразками, тоді як кількісне визначення виконували за калібрувальними залежностями, побудованими на основі серій стандартних розчинів [15].

Метод кількісного визначення було провалідовано (табл. 1) відповідно до вимог Регламенту ЄС №2023/2782 та Директиви ЄС №401/2006.

Таблиця 1

## Оцінка основних параметрів валідації

| Досліджуваний токсин | LOD, мг/кг | LOQ, мг/кг | R <sup>2</sup> | Recovery (%) | RSD (%) |
|----------------------|------------|------------|----------------|--------------|---------|
| AFB1                 | 0,1        | 0,3        | 0,9986         | 92–105       | 5       |
| DON                  | 10         | 30         | 0,9993         | 95–102       | 6       |
| ZEA                  | 5          | 15         | 0,9974         | 96–110       | 7       |
| T-2                  | 3          | 10         | 0,9959         | 93–100       | 8       |

Лінійність підтверджено в діапазоні концентрацій ~0,01–100 мг/кг ( $R^2 > 0,99$ ). Значення межі виявлення (Limit of Detection; LOD) та межі кількісного визначення (Limit of Quantification; LOQ) визначали методом серійних розведень у матриці; отримані рівні LOQ були нижчими за встановлені регуляторні межі. Точність методу оцінювали шляхом аналізу зразків, збагачених стандартами на кількох рівнях концентрацій, із показниками відновлюваності 92–110% та відносним стандартним відхиленням (RSD) < 15%. Внутрішньо-та міжденно прецизійність характеризувалася значеннями  $RSD \leq 10\%$  [17].

Відповідно даних таблиці 1, LOD та LOQ встановлювали експериментально шляхом послідовного розведення стандартних розчинів у матриці сої з оцінкою співвідношення сигнал/шум, де для LOD приймали  $S/N = 3$ , а для LOQ –  $S/N = 10$ . Коефіцієнт детермінації ( $R^2$ ) отримано за результатами лінійного калібрування в досліджуваному діапазоні концентрацій. Показники відновлюваності методу (Recovery) визначали на трьох рівнях концентрацій із поданням результатів у вигляді діапазонів значень.

**Результати і обговорення.** Первинний відбір зразків здійснювали на основі визначення ергостеролу як маркера грибної контамінації, що дозволило ідентифікувати 8 зразків (~66,7%) із підвищеною ймовірністю наявності мікотоксинів (рис. 1).

Аналіз отриманих даних свідчить про значну варіабельність показників між досліджуваними пробами. Найнижчі значення вмісту ергостеролу встановлено у пробах №1, №4, №7 та №10, де показник коливався в межах 1,82–2,37 мг/г, що може свідчити про низький рівень грибкової контамінації та належний санітарний стан продукції. Середній рівень вмісту ергостеролу зафіксовано у пробах №2, №3, №6, №8, №9 та №12 – у межах 5,54–6,34 мг/г. Такі результати можуть вказувати на помірний розвиток мікроміцетів під час зберігання або транспортування сої. Найвищі показники виявлено у пробах №5 та №11, де вміст ергостеролу становив відповідно 7,06 та 7,28 мг/г, що свідчить про підвищений рівень грибкового обсіменіння та потенційний ризик накопичення мікотоксинів.

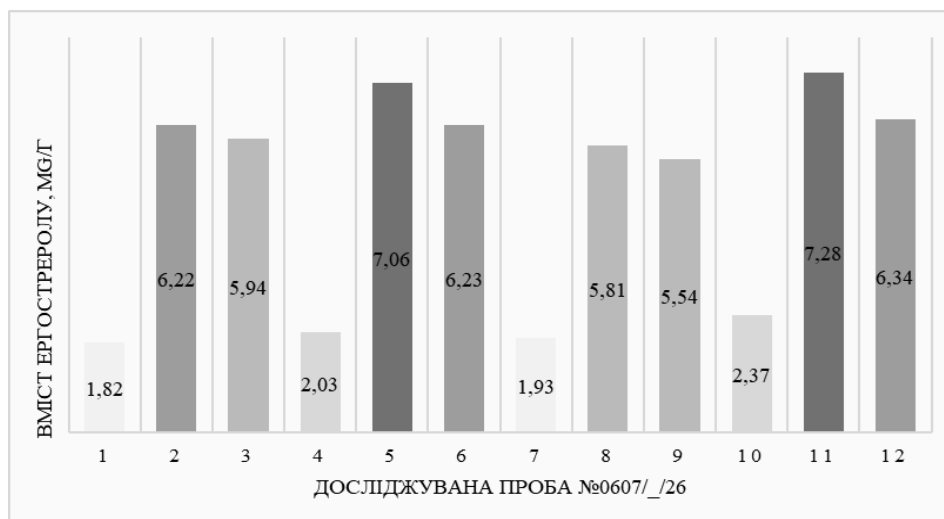


Рис. 1. Графічна інтерпретація результатів біомаркерного аналізу зразків експортної сої

Підвищений вміст ергостеролу у відібраних зразках свідчив про наявність та розвиток грибної мікробіоти у соєвій матриці, що розцінювалося як індикатор потенційної ко-контамінації мікотоксинами. Водночас негативні результати ІФА-скринінгу вказували на відсутність суттєвого грибного навантаження та низьку ймовірність накопичення цільових токсинів.

Відібрані зразки з підвищеною ймовірністю контамінації надалі досліджували методом ВЕРХ-УФ для кількісного визначення AFB1, DON, ZEA та Т-2 токсинів. Основні результати, включаючи частоту виявлення та діапазони концентрацій аналітів, наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати ВЕРХ–УФ детекції залишкових мікотоксинів

| № досліджуваної проби | AFB1, мг/кг     | DON, мг/кг      | ZEA, мг/кг      | Т–2, мг/кг      |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| №0607є/2/26           | 0,00002         | 0,00610         | 0,04057         | 0,01085         |
| №0607є/3/26           | 0,00005         | 0,07981         | 0,04100         | 0,00198         |
| №0607є/5/26           | 0,00005         | 0,04840         | 0,02361         | 0,00025         |
| №0607є/6/26           | 0,00004         | 0,01293         | 0,02349         | 0,00082         |
| №0607є/8/26           | 0,00002         | 0,00952         | 0,03858         | 0,00093         |
| №0607є/9/26           | 0,00001         | 0,00826         | 0,03110         | 0,00179         |
| №0607є/11/26          | 0,00001         | 0,00519         | 0,03170         | 0,00204         |
| №0607є/12/26          | 0,00005         | 0,00504         | 0,03750         | 0,00160         |
| Частота, %            | 66,7%           | 66,7%           | 66,7%           | 66,7%           |
| Діапазон, мг/кг       | 0,00001–0,00005 | 0,00504–0,07981 | 0,02349–0,04100 | 0,00025–0,01085 |
| Середнє, мг/кг        | 0,000031        | 0,021906        | 0,033444        | 0,002533        |
| Медіана, мг/кг        | 0,000030        | 0,008890        | 0,034600        | 0,001695        |

Обмеження аналітичної панелі чотирма мікотоксинами є методично обґрунтованим з огляду на необхідність дотримання регламентованих переліків контрольованих показників, визначених нормативно-правовими актами та стандартами офіційного контролю. Пріоритетність саме AFB1, DON, ZEA та Т-2 токсину зумовлена їх високою поширеністю, токсикологічною значущістю та наявністю встановлених гранично допустимих рівнів.

AFB1 виявлено у 8 із 12 досліджених зразків (66,7% ) у наднизьких концентраціях 0,00001–0,00005 мг/кг (середнє 0,000031 мг/кг), що свідчить про високий рівень аналітичної чутливості застосованого методу та відповідність продукції вимогам безпечності. DON також ідентифіковано у 66,7% зразків у діапазоні 0,00504–0,07981 мг/кг (середнє 0,021906 мг/кг), що вказує на низький рівень контамінації досліджених партій. ZEA визначено у 8 зразках (66,7%) у межах 0,02349–0,04100 мг/кг (середнє 0,033444 мг/кг), що узгоджується з типовими рівнями його вмісту у соєвій сировині. Т-2 виявлено у 66,7% зразків у концентраціях 0,00025–0,01085 мг/кг (середнє 0,002533 мг/кг), що підтверджує можливість надійного визначення навіть слідових кількостей аналіту із застосуванням використаного методу.

Оскільки у процесі випробувального дослідження було ідентифіковано слідові концентрації AFB1, DON, ZEA та Т-2 токсину, отримані результати свідчать про наявність комплексного характеру контамінації. З огляду на поліетіологічну природу мікотоксикозів та здатність грибів родів *Aspergillus* і *Fusarium* синтезувати широкий спектр вторинних метаболітів, доцільно рекомендувати застосування комплексного (мультианалітного) підходу до лабораторного контролю. Такий підхід передбачає одночасне визначення як регламентованих, так і «emerging» мікотоксинів, а також їх модифікованих («masked») форм, що можуть вивільнятися в організмі та впливати на реальний рівень експозиції. Використання інтегрованих методів аналізу дозволить підвищити повноту оцінки безпечності продукції та достовірність результатів моніторингу. Водночас оцінка ризику має включати аналіз можливих синергічних і адитивних токсикологічних ефектів між мікотоксинами, навіть за їх низьких концентрацій. Інтеграція зазначених підходів у систему контролю, зокрема в рамках принципів НАССР, забезпечує підвищення достовірності моніторингу та адекватну оцінку безпечності експортної продукції, тоді як застосування біомаркерних методів може слугувати інструментом підтвердження сукупного впливу ко-контамінації на організм [14, 19].

Як зазначають Ф. Тянь, Т. Я. Ву, С. Ю. Лі, П. С. Бін, Ч. Х. Ім, Х. С. Чун органи охорони здоров'я та урядові органи в усьому світі, такі як Європейське агентство з безпеки харчових продуктів (EFSA), Продовольча та сільськогосподарська організація ООН (FAO), Управління з контролю за продуктами харчування та лікарськими засобами США (FDA) та Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ), приділяють серйозну увагу забрудненню мікотоксинами, і більшість країн світу встановили обмеження на наявність основних мікотоксинів у харчових продуктах [22].

Тому вкрай важливо ретельно контролювати та регулювати забруднення мікотоксинами в ланцюжку постачання харчових продуктів, сировини, кормів для підтримки стандартів безпеки харчових продуктів та захисту здоров'я населення. Дослідники та регуляторні органи співпрацюють над розробкою рекомендацій та правил для контролю рівня мікотоксинів у харчових продуктах. Зусилля щодо зменшення забруднення мікотоксинами вимагають впровадження ефективних сільськогосподарських практик, належних умов зберігання та регулярного моніторингу в усьому ланцюжку постачання харчових продуктів [5, 8].

С. Кіран, М. Суреха та С. М. Редді підкреслюють важливість застосування профілактичних заходів як до, так і після збору врожаю. Дотримання належної сільськогосподарської та виробничої практики під час вирощування, збирання, транспортування, зберігання і реалізації зерна дозволяє зменшити ризик розвитку пліснявих грибів та накопичення мікотоксинів. Ефективним інструментом контролю є також система аналізу небезпек і критичних контрольних точок (НАССР), яка допомагає своєчасно виявляти потенційні ризики та запобігати забрудненню продукції [6].

А тому, у всьому світі для забезпечення дотримання встановлених нормативів щодо вмісту мікотоксинів у харчових продуктах і кормах застосовують різноманітні аналітичні методи в межах програм моніторингу та наукових досліджень. Такі методи повинні бути чутливими, специфічними, точними та відтворюваними, що гарантує достовірність отриманих результатів. Для оперативного контролю на всіх етапах виробництва – від сировини до готової продукції – широко використовують швидкі скринінгові тести. Крім того, для визначення найбільш поширених мікотоксинів доступний широкий спектр як якісних, так і кількісних методів аналізу, що дозволяє здійснювати комплексну оцінку рівня забруднення та забезпечувати належний рівень безпечності продукції [16].

Вибір конкретної методики має враховувати природу продукту, його матрицю та рівень можливого забруднення, оскільки продукти рослинного й тваринного походження суттєво відрізняються за складом і можуть по-різному впливати на точність аналізу. Тому оптимальним є використання методів, адаптованих до конкретного виду продукції, що забезпечує достовірність результатів і відповідність вимогам нормативних документів [11].

**Висновки.** Отримані результати підтверджують доцільність застосування інтегрованого підходу до контролю мікотоксинів, який поєднує якісний (скринінговий) та кількісний (підтверджувальний) етапи аналізу. Використання біомаркерного скринінгу дозволяє оперативно і економічно відбирати потенційно контаміновані зразки, скорочуючи обсяг дорогих лабораторних досліджень, тоді як подальше визначення методом ВЕРХ забезпечує високу точність, селективність і надійність результатів. Така двоетапна система підвищує ефективність використання лабораторних ресурсів, зменшує ризик хибнопозитивних і хибнонегативних результатів та забезпечує відповідність міжнародним вимогам безпечності. У цілому поєднання якісного та кількісного аналізу є економічно обґрунтованим і науково виправданим рішенням для рутинного моніторингу мікотоксинів у сої експортного призначення.

### Бібліографія

1. Agriopoulou, S., Stamatelopoulou, E., & Varzakas, T. Advances in occurrence, importance, and mycotoxin control strategies: Prevention and detoxification in foods. *Foods*, 2020, 9(2), 137. <https://doi.org/10.3390/foods9020137>.
2. Alba-Mejía, J. E., Dohnal, V., Domínguez-Rodríguez, G., Středa, T., Klíma, M., Mlejnková, V., & Skládanka, J. Ergosterol and polyphenol contents as rapid indicators of orchardgrass silage safety. *Heliyon*, 2023, 9 (4). <https://doi.org/10.17632/v8cy8jff664.2>.
3. Fromme, H. Human Biomonitoring I: Levels and Toxicokinetics of Short Half-Life Chemicals and Mycotoxins in Blood, Urine and Breast Milk. Springer Nature. 2026.
4. Fumagalli, F., Ottoboni, M., Pinotti, L., & Cheli, F. Integrated mycotoxin management system in the feed supply chain: Innovative approaches. *Toxins*, 2021, 13(8), 572. <https://doi.org/10.3390/toxins13080572>.
5. Khan, R. Mycotoxins in food: Occurrence, health implications, and control strategies-A comprehensive review. *Toxicon*, 2024, 248, 108038. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2024.108038>.
6. Kiran, S., Surekha, M., & Reddy, S. M. Management of mycotoxin problems: prospects and limitations. In *Plant microbiome and biological control: emerging trends and applications* (pp. 477-533). Cham: Springer Nature Switzerland. 2025. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-75845-4\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-031-75845-4_20).
7. Lafi, A. S. A., Tzar, M. N., Santhanam, J., & Huyop, F. Comparing ergosterol identification by HPLC with fungal serology in human sera. *Heliyon*, 2024, 10(19). [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(24\)14408-8](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)14408-8).
8. Lin, R., Yuan, J., Feng, H., Liu, Y., Fan, Y., Tan, Y., & Tang, Z. Comprehensive overview: QuEChERS methods for mycotoxin determination in different matrices. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2025, 42(11), 1584-1613. <https://doi.org/10.1080/19440049.2025.2572012>.
9. Liu, S., Wu, Y., Liu, T., Ye, J., Li, L., Guan, X., & Wang, S. Development of an Integrated Multifunctional Column for Rapid Pretreatment and Determination of Trichothecenes in Cereals and Feeds with HPLC-MS/MS. *Foods*, 2025, 14 (9), 1466. <https://doi.org/10.3390/foods14091466>.

10. Maciel, G., Castellari, C. C., Cardoso, L. M., Abadía, M. B., Busato, P., & Bartosik, R. E. Fungal biota and mycotoxins contamination in soybean expeller. *Agronomy*, 2025, 15(4), 807. <https://doi.org/10.3390/agronomy15040807>.
11. Nunes, M. D. G. P., Pizzutti, I. R., Brackmann, A., Reichert, B., Zorzella Fontana, M. E., Duarte Dos Santos, I., & Cardoso, C. D. Multimycotoxin Determination in Grains: A Comprehensive Study on Method Validation and Assessment of Effectiveness of Controlled Atmosphere Storage in Preventing Mycotoxin Contamination. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(38), 11440–11450. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c03208>.
12. Papadopoulou, A., Boti, V., & Nannou, C. Towards Greener Sample Preparation: A Review on Micro-QuEChERS Advances and Applications in Food, Environmental, and Biological Matrices. *Separations*, 2025, 12 (12), 339. <https://doi.org/10.3390/separations12120339>.
13. Porep, J. U., Walter, R., Kortekamp, A., & Carle, R. Ergosterol as an objective indicator for grape rot and fungal biomass in grapes. *Food Control*, 2014, 37, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.09.012>.
14. Radko, L., Dudek, K., Żakowicz, P., Smulski, S., & Kozdrowski, R. Health Problems with Mycotoxins in Cattle-A Review. *Molecules*, 2025, 31 (1), 43. <https://doi.org/10.3390/molecules31010043>.
15. Rahmani, A., Jinap, S., & Soleimany, F. Qualitative and quantitative analysis of mycotoxins. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 2009, 8(3), 202–251. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2009.00079.x>.
16. Scott, P. M. Mycotoxin methodology. *Food Additives & Contaminants*, 1995, 12(3), 395–403. <https://doi.org/10.1080/02652039509374321>.
17. Steyn, P. S., Thiel, P. G., & Trinder, D. W. Detection and quantification of mycotoxins by. *Mycotoxins and animal foods*, 1991, 165.
18. Tian, F., Woo, S. Y., Lee, S. Y., Park, S. B., Im, J. H., & Chun, H. S. Mycotoxins in soybean-based foods fermented with filamentous fungi: Occurrence and preventive strategies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, 21(6), 5131–5152. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13032>.
19. Vitalini, S., Iriti, M., & Vallone, L. Mycotoxins in European Union Regulations (2023–2025). *Italian Journal of Food Safety*, 2025, 15 (1), 14096. <https://doi.org/10.4081/ijfs.2025.14096>.
20. Yang, X., Yao, M., Liao, W., & Li, X. Adsorption–Degradation Integrated Approaches to Mycotoxin Removal from Food Matrices: A Comprehensive Review. *Toxins*, 2025, 17 (11), 556. <https://doi.org/10.3390/toxins17110556>.

## References

1. Agriopoulou, S., Stamatelopoulou, E., & Varzakas, T. (2020). Advances in occurrence, importance, and mycotoxin control strategies: Prevention and detoxification in foods. *Foods*, 9 (2), 137. <https://doi.org/10.3390/foods9020137>.
2. Alba-Mejía, J. E., Dohnal, V., Domínguez-Rodríguez, G., Středa, T., Klíma, M., Mlejnková, V., & Skládanka, J. (2023). Ergosterol and polyphenol contents as rapid indicators of orchardgrass silage safety. *Heliyon*, 9 (4). <https://doi.org/10.17632/v8cy8jff664.2>.
3. Fromme, H. (2026). *Human Biomonitoring I: Levels and Toxicokinetics of Short Half-Life Chemicals and Mycotoxins in Blood, Urine and Breast Milk*. Springer Nature.
4. Fumagalli, F., Ottoboni, M., Pinotti, L., & Cheli, F. (2021). Integrated mycotoxin management system in the feed supply chain: Innovative approaches. *Toxins*, 13 (8), 572. <https://doi.org/10.3390/toxins13080572>.
5. Khan, R. (2024). Mycotoxins in food: Occurrence, health implications, and control strategies – A comprehensive review. *Toxicon*, 248, 108038. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2024.108038>.
6. Kiran, S., Surekha, M., & Reddy, S. M. (2025). Management of mycotoxin problems: prospects and limitations. In *Plant microbiome and biological control: emerging trends and applications* (pp. 477–533). Cham: Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-75845-4\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-031-75845-4_20).
7. Lafi, A. S. A., Tzar, M. N., Santhanam, J., & Huyop, F. (2024). Comparing ergosterol identification by HPLC with fungal serology in human sera. *Heliyon*, 10(19). [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(24\)14408-8](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)14408-8).

- 
8. Lin, R., Yuan, J., Feng, H., Liu, Y., Fan, Y., Tan, Y., & Tang, Z. (2025). Comprehensive overview: QuEChERS methods for mycotoxin determination in different matrices. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 42 (11), 1584-1613. <https://doi.org/10.1080/19440049.2025.2572012>.
  9. Liu, S., Wu, Y., Liu, T., Ye, J., Li, L., Guan, X., & Wang, S. (2025). Development of an Integrated Multifunctional Column for Rapid Pretreatment and Determination of Trichothecenes in Cereals and Feeds with HPLC-MS/MS. *Foods*, 14 (9), 1466. <https://doi.org/10.3390/foods14091466>.
  10. Maciel, G., Castellari, C. C., Cardoso, L. M., Abadía, M. B., Busato, P., & Bartosik, R. E. (2025). Fungal biota and mycotoxins contamination in soybean expeller. *Agronomy*, 15(4), 807. <https://doi.org/10.3390/agronomy15040807>.
  11. Nunes, M. D. G. P., Pizzutti, I. R., Brackmann, A., Reichert, B., Zorzella Fontana, M. E., Duarte Dos Santos, I., & Cardoso, C. D. (2021). Multimycotoxin Determination in Grains: A Comprehensive Study on Method Validation and Assessment of Effectiveness of Controlled Atmosphere Storage in Preventing Mycotoxin Contamination. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(38), 11440–11450. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c03208>.
  12. Papadopoulou, A., Boti, V., & Nannou, C. (2025). Towards Greener Sample Preparation: A Review on Micro-QuEChERS Advances and Applications in Food, Environmental, and Biological Matrices. *Separations*, 12(12), 339. <https://doi.org/10.3390/separations12120339>.
  13. Porep, J. U., Walter, R., Kortekamp, A., & Carle, R. (2014). Ergosterol as an objective indicator for grape rot and fungal biomass in grapes. *Food Control*, 37, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.09.012>.
  14. Radko, L., Dudek, K., Żakowicz, P., Smulski, S., & Kozdrowski, R. (2025). Health Problems with Mycotoxins in Cattle-A Review. *Molecules*, 31(1), 43. <https://doi.org/10.3390/molecules31010043>.
  15. Rahmani, A., Jinap, S., & Soleimany, F. (2009). Qualitative and quantitative analysis of mycotoxins. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 8 (3), 202–251. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2009.00079.x>
  16. Scott, P. M. (1995). Mycotoxin methodology. *Food Additives & Contaminants*, 12(3), 395–403. <https://doi.org/10.1080/02652039509374321>.
  17. Steyn, P. S., Thiel, P. G., & Trinder, D. W. (1991). Detection and quantification of mycotoxins by. *Mycotoxins and animal foods*, 165.
  18. Tian, F., Woo, S. Y., Lee, S. Y., Park, S. B., Im, J. H., & Chun, H. S. (2022). Mycotoxins in soybean-based foods fermented with filamentous fungi: Occurrence and preventive strategies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(6), 5131–5152. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13032>.
  19. Vitalini, S., Iriti, M., & Vallone, L. (2025). Mycotoxins in European Union Regulations (2023–2025). *Italian Journal of Food Safety*, 15(1), 14096. <https://doi.org/10.4081/ijfs.2025.14096>
  20. Yang, X., Yao, M., Liao, W., & Li, X. (2025). Adsorption-Degradation Integrated Approaches to Mycotoxin Removal from Food Matrices: A Comprehensive Review. *Toxins*, 17(11), 556. <https://doi.org/10.3390/toxins17110556>.
-