

**О.В. Медведєва
Т.П. Мірзак**

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ



**Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет**

**О.В. Медведєва
Т.П. Мірзак**

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ

**Навчальний посібник
Частина 1**

Кропивницький – 2026

УДК 504.062:613.2

Рецензенти:

Г.Ф. Аркушина – кандидат біологічних наук, завідувач відділу фітосанітарного аналізу ДУ Кіровоградська фітосанітарна випробувальна лабораторія
Держпродспоживслужби

М.М. Ковальов – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри загального землеробства Центральноукраїнського національного технічного університету

*Затверджено до друку рішенням Вченої ради
Центральноукраїнського національного технічного університету
(протокол № 10 від 25 травня 2026 року)*

Медведєва О.В.

Екологічна безпека продуктів харчування : навчальний посібник / О.В. Медведєва, Т.П. Мірзак – Кропивницький : ЦНТУ, 2026. – 64 с.

У навчальному посібнику (частина 1) викладено теоретичні та практичні аспекти формування екологічної безпеки харчової сировини, представлено закономірності міграції ксенобіотиків по трофічних ланцюгах та їх роль у забрудненні продовольчого кошика.

Навчальний посібник призначений для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня спеціальності Е2 «Екологія», викладачів, аспірантів, а також фахівців у галузі охорони довкілля, агроекологічного моніторингу та екологічного контролю якості продовольства.

Декларація прозорості та академічної доброчесності

Науково-методична концепція та екологічна логіка посібника є оригінальним авторським твором. Окремі схеми та ілюстрації візуалізовано авторами за допомогою комп'ютерних технологій генеративного штучного інтелекту (*Gemini*) як технічного засобу оформлення.

© Центральноукраїнський національний
технічний університет, 2026
© Медведєва О.В., Мірзак Т.П., 2026

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. Агроекологічні чинники формування безпеки харчової сировини.....	7
1.1. Екологічний стан ґрунтів та його вплив на склад рослинної продукції.....	7
1.2. Вплив кліматичних змін на безпеку агропродукції.....	9
1.3. Порівняльний аналіз систем землеробства.....	11
РОЗДІЛ 2. Хімічні ксенобіотики у харчових ланцюгах.....	17
2.1. Пестицидне навантаження на продовольчу сировину.....	17
2.2. Важкі метали та металоїди.....	21
2.3. Стійкі органічні забруднювачі та «вічні хімікати» (PFAS).....	25
2.4. Мікро- та нанопластик як новий екологічний виклик.....	29
РОЗДІЛ 3. Біологічні чинники зниження безпеки харчових продуктів.....	34
3.1. Мікотоксини як природні екологічні забруднювачі.....	34
3.2. Наслідки масового застосування антибіотиків у тваринництві.....	36
3.3. Бактеріальне забруднення та екологія патогенів.....	39
3.4. Екотоксикологічні ризики водних екосистем та аквакультури.....	44
РОЗДІЛ 4. Практичні аспекти зниження екотоксикологічного навантаження	49
4.1. Побутові методи очищення харчових продуктів.....	49
4.2. Природні механізми захисту організму від ксенобіотиків.....	54
4.3. Концепція локальних та сезонних продуктів.....	57
ВИСНОВКИ.....	62
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	63

ВСТУП

Багатокомпонентне і хронічне низькодозове навантаження на організм людини через продукти харчування стало вже звичним. Але це не зменшує його небезпеку, а навпаки посилює увагу до цієї прихованої загрози.

Безпечність продуктів харчування (*Food Safety*) - це інтегральна характеристика продовольчої сировини та готових продуктів, яка гарантує відсутність хімічних, біологічних чи фізичних забруднювачів у концентраціях, здатних чинити прямий або опосередкований, деструктивний вплив на здоров'я людини та її нащадків за умов звичайного споживання. На відміну від концепції продовольчої забезпеченості (*Food Security*), яка визначає фізичну та економічну доступність їжі для запобігання голоду, екологічна безпека фокусується на біогеохімічній та токсикологічній чистоті трофічних ланцюгів.

Наукова проблема формування безпечного продовольчого кошика лежить на стику загальної екології, агроекології, біохімії та токсикології. Людина як консумент вищого порядку замикає більшість антропогенно змінених харчових ланцюгів. Токсиканти, що потрапляють у довкілля, не зникають безслідно, а зазнають процесів біоаккумуляції та біомагніфікації, тобто геометричного зростання концентрації при переході на вищі трофічні рівні. Як наслідок, кінцевий споживач отримує максимальну інтегральну дозу ксенобіотиків.

Метою вивчення дисципліни “Екологічна безпека продуктів харчування” є формування у майбутніх фахівців системного розуміння агроекологічних процесів та практичних навичок, необхідних для оцінки, моделювання та мінімізації ризиків накопичення ксенобіотиків у харчових ланцюгах для превентивного захисту здоров'я людини.

Для запобігання термінологічній та регуляторній плутанині, у межах дисципліни ми розмежовуємо сфери контролю трьох паралельних систем моніторингу (табл. 1).

Таблиця 1. Координаційні сфери моніторингу та регулювання продовольчої безпеки

Сфера контролю	Об'єкт моніторингу	Головне науково-практичне завдання	Регуляторний орган в Україні
Екологічний моніторинг	Атмосферне повітря, природні поверхневі й підземні води, природні ґрунти.	Надійне виявлення первинних джерел та загальних ареалів антропогенного забруднення біосфери.	Міндовкілля, Держекоінспекція
Агроекологічний моніторинг	Орні землі, пасовища, поливні води, зелені корми, сільськогосподарська сировина.	Аналіз транзиту та накопичення ксенобіотиків у сировині на етапі її вирощування; сертифікація чистих зон.	Науково-дослідні установи, атестовані агрохімічні лабораторії
Гігієнічний нагляд (Food Safety)	Харчова сировина на підприємствах, технологічні процеси, пакування, готова продукція.	Контроль відповідності готових продуктів санітарно-гігієнічним регламентам безпеки; стандарти.	Держпродспоживслужба, сертифіковані лабораторії контролю якості

Екологічний підхід дозволяє об'єднати ці системи в єдиний превентивний комплекс. Замість пасивного виявлення отрути в готовому продукті на прилавку магазину, екологічна безпека пропонує керувати ризиками на етапі проектування агроландшафтів, оцінки стану ґрунтової біоти та прогнозування міграції речовин.

Представлена праця є першою частиною комплексної серії навчальних видань з екологічної безпеки продовольства.

Мета цієї частини - закласти фундаментальні екологічні, хімічні та біологічні основи формування безпеки сировини на етапі її отримання в агросфері, а також надати практичні інструменти превентивного захисту споживача.

Матеріал першої частини охоплює агроекологічні чинники вирощування культур, особливості міграції пріоритетних ксенобіотиків у харчових ланцюгах, біологічні ризики, а також прикладні побутові методи зниження екотоксикологічного навантаження.

Наступна, друга частина навчального посібника буде повністю присвячена детальному аналізу технологічних аспектів безпеки. У ній будуть детально розглянуті екотоксикологічні ризики глибокої промислової переробки сировини, екологічна безпека сучасного харчового пакування, біологічні компроміси використання генетично модифікованих організмів, радіаційна безпека продовольства, а також державні та міжнародні механізми екологічного регулювання, стандартизації та сертифікації споживчого ринку.

РОЗДІЛ 1

АГРОЕКОЛОГІЧНІ ЧИННИКИ ФОРМУВАННЯ БЕЗПЕКИ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ

1.1. Екологічний стан ґрунтів та його вплив на склад рослинної продукції

Ґрунт є складною гетерогенною біокосною системою, яка визначає хімічний та нутритивний склад сільськогосподарських культур. Будь-які антропогенні зміни у структурі, хімічному складі та біологічній активності ґрунтів трансформують внутрішній склад рослин, змінюючи їхню якість та безпеку для кінцевого споживача.

Криза інтенсивного землеробства призвела до специфічної форми деградації орних земель - їхнього біохімічного та якісного виснаження, що стало першопричиною зниження біологічної цінності продуктів харчування.

Для розуміння механізмів формування мінерального складу рослин необхідно розглянути процеси, які відбуваються у ризосфері, тобто прикореневій зоні, що перебуває під безпосереднім впливом виділень коріння. Більшість мікроелементів, таких як залізо, цинк, магній, мідь, кобальт та селен, перебувають у ґрунті у формі важкорозчинних мінеральних сполук або міцно зв'язані з ґрунтовим вбирним комплексом (ГВК). Рослини не здатні самостійно поглинати ці елементи у таких хімічних формах. Транзит мінеральних речовин із твердої фази ґрунту до рослинної клітини забезпечується діяльністю ґрунтового мікробіому - комплексу бактерій та мікроскопічних грибів.

Ризосферні мікроорганізми виділяють у навколишнє середовище комплекс органічних кислот, таких як лимонна, яблучна, щавлева та специфічні сполуки - сидерофори. Ці речовини вступають у взаємодію з нерозчинними сполуками заліза або цинку, переводячи їх у рухомі, розчинні форми, які легко засвоюються кореневою системою.

Крім того, найважливішим чинником мінерального живлення більшості культурних рослин є мікориза - симбіоз міцелію гриба з корінням рослини. Грибні гіфи мають значно більшу проникну здатність порівняно з кореневими волосками. Вони поширюються у мікропорах ґрунту на значні відстані, забезпечуючи поглинання дефіцитного фосфору та більшості мікроелементів, і передають їх рослині в обмін на продукти фотосинтезу. Проте сучасні агротехнології, орієнтовані на максимальне отримання валового врожаю призвели до деструкції симбіотичних комплексів у ризосфері. Регулярна глибока оранка з оборотом пласта порушує стратифікацію ґрунтових шарів, знищуючи аеробну мікрофлору та розриваючи міцеліальні мережі мікоризних грибів. Одночасно з цим масове застосування хімічних засобів захисту, зокрема фунгіцидів, чинить пряму токсичну дію на корисну мікрофлору ризосфери. Залишаючись без природних біологічних супутників, рослини втрачають здатність ефективно поглинати мікроелементи з ґрунтового розчину.

Ситуацію значно ускладнює тривале внесення високих доз макро добрив, що містять переважно азот, фосфор та калій (так званий комплекс NPK). Стимуляція рослин високими дозами азотних добрив призводить до стрімкого збільшення біомаси, проте швидкість

накопичення сухих речовин, вітамінів та мікроелементів відстає від темпів росту тканин. В агроєкології цей процес відомий як ефект розведення або дилуції нутрієнтів. Зовні плоди виглядають стандартно і відповідають товарним вимогам, але вміст біологічно активних речовин у них виявляється значно нижчим за фізіологічну норму.

Крім того, надлишок мінеральних добрив запускає процеси хімічного антагонізму в ґрунтовому розчині. Наприклад, надмірна концентрація фосфат-іонів призводить до зв'язування іонів цинку та заліза з утворенням нерозчинних фосфатів. У результаті рослина відчуває гострий дефіцит цих елементів навіть на тих ґрунтах, де їхній загальний валовий вміст є високим. Надлишок калію аналогічним чином блокує надходження магнію та кальцію в рослинні клітини через конкуренцію за іонні канали в процесі всмоктування. Реальні екологічні наслідки такого підходу підтверджуються довготривалими моніторинговими дослідженнями хімічного складу сільськогосподарської продукції, що проводилися науковцями впродовж останніх десятиліть у країнах Європи та США. За зведеними даними ретроспективних моніторингів (зокрема аналітичних оглядів зменшення нутрієнтної щільності), середній вміст кальцію в овочевій групі знизився майже на 45%, заліза - на 30-40%, а магнію - на 25% [1]. Аналогічні тенденції простежуються і для зернових культур, де суттєво знизилася концентрація цинку, міді та селену [2].

З погляду екологічної безпеки харчування цей процес веде до поширення серед населення так званого прихованого голоду. Людина споживає достатню за калорійністю кількість їжі, проте хронічно не отримує мікронутрієнти, необхідні для нормального функціонування ферментних систем, підтримання імунітету та антиоксидантного захисту організму. Так, наприклад, брак заліза в рослинній їжі провокує розвиток анемій, дефіцит цинку негативно впливає на ендокринну систему, а зниження рівня магнію збільшує ризики серцево-судинних порушень.

Зниження буферної ємності та техногенне підкислення ґрунтів інтенсифікують міграцію полютантів, а систематичне внесення фізіологічно кислих азотних добрив (наприклад, аміачної селітри) зумовлює підкислення ґрунтового розчину. Зниження водневого показника (рН) підвищує рухливість не лише корисних елементів, а й небезпечних важких металів, таких як кадмій, свинець та алюміній і рослини починають активно поглинати ці токсиканти, які раніше перебували у зв'язаному, безпечному стані.

Отже, стабілізація мінерального профілю культур потребує регенеративних практик: мінімізації механічного обробітку, сидерації та реактивації автохтонного мікробіому. Виходом із кризи є перехід до регенеративного та органічного землеробства. Ці методи передбачають відмову від глибокої оранки, відновлення вмісту органічної речовини (гумусу) через внесення компостів та сидератів, а також широке застосування біопрепаратів на основі живих культур ризосферних бактерій та мікоризних грибів. Тільки через відновлення біологічного здоров'я та природної структури ґрунту можна повернути рослинній продукції її повноцінний нутритивний статус та гарантувати її хімічну безпеку для споживача.

1.2. Вплив кліматичних змін на безпеку агропродукції

Аналіз впливу кліматичних змін традиційно обмежується оцінкою економічних збитків від посух, зниженні валового збору зерна чи зміні географічних зон вирощування теплолюбних культур. Проте, сучасні дослідження зміщують фокус до біохімічних трансформацій у рослинній сировині: глобальні зміни клімату не просто знижують кількість вирощеної їжі, вони суттєво змінюють її внутрішній хімічний склад, стимулюють накопичення природних токсинів та збільшують хімічне навантаження на агроєкосистеми. Кліматичні зрушення, що супроводжуються підвищенням середньорічних температур, тривалими періодами спеки, нерівномірним розподілом опадів та зростанням концентрації вуглекислого газу в атмосфері, безпосередньо впливають на фізіологію рослин.

Рослинний організм є відкритою системою, яка миттєво реагує на будь-який зовнішній стрес зміною свого метаболізму. Коли умови довкілля виходять за межі фізіологічної норми, у тканинах сільськогосподарських культур запускаються механізми адаптації, які часто мають негативні наслідки для безпеки кінцевого продукту.



Рис. 1. Кліматичні зміни та безпека агропродукції

Одним із найбільш вивчених, але водночас парадоксальних чинників впливу на якість рослинної сировини є стрімке зростання концентрації діоксиду вуглецю (CO_2) в атмосфері. З погляду класичної ботаніки, вуглекислий газ є головним будівельним матеріалом для фотосинтезу, і його збільшення мало б стимулювати продуктивність рослин. Дійсно, в умовах підвищеного вмісту CO_2 більшість культурних рослин (особливо пшениця, рис, соя та овочі) починають активніше синтезувати вуглеводи, такі як крохмаль та цукри. Проте цей бурхливий ріст супроводжується явищем, суть якого полягає в тому, що швидкість накопичення рослиною вуглецю значно випереджає швидкість всмоктування корінням інших есенціальних елементів з ґрунту. Рослинні тканини стають масивнішими, але біохімічно «біднішими» [3].

Наукові експерименти за технологією FACE (Free-Air Carbon Dioxide Enrichment), за яких рослини вирощують на відкритих полях під постійним обдувом вуглекислим газом, показали тривожні результати. У зерні пшениці та рису, вирощених в умовах прогнозованого на середину XXI століття рівня CO₂, вміст білка знижується на 10–15%. Водночас концентрація критично важливих для здоров'я людини мікроелементів, таких як залізо та цинк, падає в середньому на 5–10%. Для споживача це означає, що звичний хліб чи крупи стають менш поживними, що посилює глобальну проблему дефіциту мікронутриєнтів у раціоні.

Іншим прямим наслідком кліматичних змін є тривалі періоди посухи, що чергуються з аномальними зливами. Водний дефіцит є найпотужнішим фактором стресу для сільськогосподарських культур. В умовах сухості ґрунту та високих температур у рослинах суттєво порушується азотний обмін. З погляду екологічної безпеки це призводить до різкого стрибка концентрації нітратів у тканинах рослин, навіть якщо фермери не перевищували норми внесення азотних добрив.

Біохімічний механізм цього явища пов'язаний із роботою специфічного рослинного ферменту - нітратредуктази. У нормальних умовах рослина поглинає з ґрунту нітрати, і цей фермент миттєво переробляє їх у безпечні амінокислоти та білки. Проте для стабільної роботи нітратредуктази потрібна достатня кількість вологи та оптимальний тургор, тобто внутрішній тиск у клітинах. Коли настає посуха, робота ферменту практично повністю блокується. Водночас коріння, використовуючи залишки глибокої вологи, продовжує пасивно всмоктувати нітрати з ґрунту. Оскільки механізм їхньої переробки вимкнений, токсичні солі азотної кислоти починають накопичуватися в стеблах, листі та плодах. Особливо вразливими до цього процесу є листові овочі, наприклад, шпинат, салат, також столовий буряк, капуста та зелені корми для сільськогосподарських тварин. Споживання такої продукції викликає хронічну нітратну інтоксикацію у людини, яка згодом може трансформуватися у внутрішнє утворення нітрозамінів - сполук із вираженою канцерогенною дією.

Одним з найнебезпечніших біологічних викликів, пов'язаних із потеплінням, є глобальна міграція мікроскопічних грибів та їхніх отруйних виділень - мікотоксинів. Раніше географія поширення пліснявих грибів була чітко розмежована за кліматичними зонами. Наприклад, гриби роду *Fusarium*, що виділяють помірно токсичні речовини, домінували в помірних широтах (зокрема в Україні). Натомість гриби роду *Aspergillus*, здатних синтезувати термостабільні гепатоканцерогени класу афлатоксинів, зустрічалися виключно в тропічних та субтропічних регіонах. Сьогодні через зміщення кліматичних зон на північ ситуація кардинально змінилася. Тривала літня спека та висока вологість під час збирання врожаю створили ідеальні умови для розвитку *Aspergillus flavus* у регіонах, де їх раніше ніколи не фіксували. Афлатоксин В1, який є потужним гепатотоксином (руйнує печінку) та офіційно визнаним канцерогеном першого класу небезпеки, дедалі частіше виявляють у кукурудзі, соняшнику та горіхах, вирощених у країнах Південної та Центральної Європи.

Ця проблема має небезпечний каскадний ефект для тваринництва. Коли корови споживають забруднений афлатоксинами силос чи зерновідходи, отрута в їхньому організмі трансформується і переходить у молоко у формі афлатоксину М1. Ця сполука є надзвичайно

стійкою: вона не руйнується під час пастеризації, ультрапастеризації чи виготовлення сирів, потрапляючи безпосередньо на стіл до кінцевого споживача і створюючи серйозні ризики, особливо для дитячого організму.

Європейське агентство з безпеки харчових продуктів (EFSA) впродовж останніх років регулярно публікує попередження про зростання відсотка забрудненого молока в країнах Дунайського басейну саме через кліматичний чинник.

Кліматичні зміни діють на екологічну безпеку харчування не лише прямо, а й опосередковано - через зміну поведінки шкідників та збудників хвороб рослин. М'які зими, відсутність стабільних морозів та ранній наступ весни призводять до того, що популяції комах-шкідників та спори грибів успішно перезимовують і починають свій розвиток значно раніше. Багато видів шкідників у нових кліматичних умовах встигають дати за один сезон не одне-два, а три або навіть чотири покоління.

Для захисту врожаю аграрії змушені радикально збільшувати кількість хімічних обробок полів. Кількість обприскувань пестицидами за сезон зростає в рази, що автоматично підвищує ймовірність збереження залишків отрутохімікатів у готовому продукті. Крім того, в умовах високих температур деякі класи пестицидів розпадаються в ґрунті значно швидше, змушуючи фермерів використовувати стійкіші, токсичніші або нові комбіновані препарати, довгостроковий вплив яких на організм людини ще до кінця не вивчений наукою.

З огляду на це, адаптація агроєкологічного моніторингу до умов кліматичних змін потребує переходу від фіксації фактичного забруднення до превентивного моделювання ризиків.

1.3. Порівняльний аналіз систем землеробства та екологічна оцінка кінцевої продукції

Кожна модель землекористування та захисту рослин напряду впливає на екологічну безпеку та нутритивний профіль сільськогосподарської продукції.

У світовій практиці сформувались три основні агротехнологічні системи, які принципово відрізняються рівнем антропогенного навантаження на агроєкосистеми, ступенем залучення хімічного синтезу та методами контролю біотичних факторів:

- промислове або інтенсивне господарство,
- системи з інтегрованим захистом рослин;
- сертифіковане органічне виробництво.

Екологічна оцінка кінцевої продукції кожної з цих систем потребує детального аналізу потенційних ризиків хімічного забруднення та біологічної цінності отриманих продуктів.

1.3.1. Промислове інтенсивне землеробство

Промислове землеробство орієнтоване на те, щоб отримати максимальний вихід продукції з одиниці площі через інтенсивне використання засобів хімізації. Агротехнологічний комплекс цієї системи базується на поєднанні трьох технологічних чинників: застосуванні високих доз легкорозчинних мінеральних добрив, переважно азоту, фосфору та калію - NPK, масовому використанні синтетичних пестицидів (гербіцидів, фунгіцидів, інсектицидів) та вирощуванні монокультур із застосуванням інтенсивного механічного обробітку ґрунту.

Екологічна оцінка кінцевої продукції промислового господарства виявляє комплекс стійких деструктивних трендів, а саме:

- *Залишки синтетичних пестицидів*

Через багаторазові обробки посівів упродовж вегетаційного періоду в продуктах часто виявляють залишки діючих речовин пестицидів та їхніх токсичних метаболітів. Особливу небезпеку становлять системні препарати (наприклад, неонікотиноїди чи деякі класи фосфорорганічних сполук), які проникають у внутрішні тканини рослини і не можуть бути видалені шляхом звичайного поверхневого миття чи механічного очищення плодів. Хронічне надходження цих речовин в організм людини навіть у кількостях, що не перевищують офіційні максимально допустимі рівні (МДР), має кумулятивний ефект, чинить гонадотоксичну, нейротоксичну та ендокринну дію.

- *Акумуляція нітратів*

Постійне внесення високих доз синтетичних азотних добрив призводить до накопичення вільних нітрат-іонів (NO_3^-) у вегетативних органах рослин. Найвищий ступінь накопичення фіксується у листових овочах, коренеплодах та ранній продукції. Потрапляючи в організм людини, нітрати під дією мікрофлори травного тракту відновлюються до значно токсичніших нітритів (NO_2^-). Нітрит-іони окиснюють двовалентне залізо гемоглобіну ($\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$), перетворюючи його на метгемоглобін, який втрачає здатність транспортувати кисень, що викликає гемічну гіпоксію. Крім того, в кислому середовищі шлунку нітрити вступають у реакції з вторинними амінами, утворюючи висококанцерогенні нітрозаміни.

- *Транзит важких металів*

Використання низькоякісних фосфорних добрив (фосфоритів та апатитів), які не пройшли належного очищення в процесі виробництва, є основним джерелом накопичення в ґрунті кадмію (Cd^{2+}) та свинцю (Pb^{2+}).

Фізіологічне підкислення ґрунтів, зумовлене систематичним застосуванням аміачних форм азотних добрив, переводить ці важкі метали у рухомий, легкозасвоюваний рослинами стан. Кадмій, будучи хімічним аналогом цинку, активно поглинається корінням і накопичується в зерні пшениці, насінні соняшнику та овочах, справляючи згодом виражену нефротоксичну та гонадотоксичну дію на організм споживача такої рослинної продукції.

- *Якісне знецінення (ефект розбавлення)*

Швидкий ріст біомаси під дією форсованого азотного підживлення призводить до того, що концентрація сухих речовин, незамінних амінокислот, антиоксидантів та есенціальних мікроелементів (Fe, Zn, Mg, Se) на одиницю маси сировини виявляється суттєво нижчою за фізіологічну норму. Споживач отримує візуально привабливий, але біологічно бідний продукт.

1.3.2. Системи з біологічним захистом рослин або інтегроване землеробство

Інтегроване виробництво засноване на концепції інтегрованого управління шкідливими організмами. Його головна мета - не повне знищення шкідливих видів, а утримання їхньої чисельності нижче економічного порогу шкодочинності (ЕПШ).

У цих системах хімічні препарати застосовують лише за перевищення порогу ЕПШ у разі виникнення загрози епіфітотій. Пріоритет віддається біологічним методам захисту:

- використанню ентомофагів (трихограми, габробракона тощо);

- растосуванню біопрепаратів на основі бактерій (наприклад, *Bacillus thuringiensis*), вірусів та ентомопатогенних грибів;
- використанню статевих феромонів для дезорієнтації шкідників та моніторингу їхньої чисельності;
- застосуванню імуномодуляторів рослин природного походження.

Екологічна оцінка продукції інтегрованого агровиробництва свідчить про значне покращення показників хімічної безпеки порівняно з промисловим сектором. Завдяки жорсткому дотриманню термінів очікування, тобто часу від останньої обробки до збирання врожаю та заміні найбільш токсичних засобів хімічного захисту біологічними аналогами, залишки синтетичних пестицидів у кінцевій сировині виявляються вкрай рідко і зазвичай перебувають на рівні межі аналітичного визначення приладів.

Проте ризики накопичення нітратів та дисбалансу мінерального складу в таких системах залишаються помірними, оскільки використання мінеральних добрив, хоч і в оптимізованих, розрахованих дозах все ще дозволене. Інтегроване землеробство є найбільш реалістичним кроком до масового екологічно безпечного продовольства, оскільки воно дозволяє зберігати високу врожайність культур при мінімальному ксенобіотичному навантаженні на кінцевий продукт.

1.3.3. Сертифіковане органічне виробництво

Органічне землеробство є цілісною екологічною системою управління виробництвом, що регульована суворими міжнародними та національними стандартами (зокрема, Регламентом ЄС 2018/848). Вона передбачає повну відмову від використання синтетичних азотних, фосфорних та калійних добрив, синтетичних пестицидів, регуляторів росту, генетично модифікованих організмів (ГМО) та іонізуючого випромінювання.

Родючість ґрунту в органічних господарствах підтримується виключно за рахунок біологічних факторів: складних сівозмін із високою часткою бобових культур (для біологічної фіксації атмосферного азоту), внесення органічних добрив (компостів, гною, сидератів), а також стимуляції природного ґрунтового мікробіому та мікоризи.

Екологічна та нутритивна оцінка сертифікованої органічної продукції демонструє унікальні якісні характеристики, а саме:

- *Хімічна безпека*

Стандарти органічного виробництва гарантують повну відсутність залишків синтетичних пестицидів у кінцевому продукті. Будь-яке виявлення таких сполук під час лабораторного скринінгу веде до негайної ануляції органічного сертифіката на партію продукції.

Знижений вміст нітратів

Оскільки в органічному виробництві заборонені легкорозчинні мінеральні азотні добрива, рослини отримують Нітроген виключно через повільну мінералізацію органічної речовини ґрунту мікроорганізмами. Це забезпечує фізіологічно збалансоване живлення рослини, що знижує вміст нітратів у готових овочах та зелені в середньому на 30–50% порівняно з промисловими аналогами.

- Висока нутритивна щільність

Завдяки активному функціонуванню мікоризи та збереженому біологічному здоров'ю ґрунту, органічна сировина містить суттєво більше сухих речовин (на 10–15%). Численні мета-аналізи підтверджують, що в органічних овочах та фруктах концентрація вітаміну С, заліза, магнію, фосфору та антиоксидантів (поліфенолів, флавоноїдів) є вищою на 20–40%.

Ці біоактивні сполуки рослини синтезують самостійно для захисту від шкідників у природних умовах, і саме вони визначають високу дієтичну та профілактичну цінність продукту для людини.

- Управління ризиками

Попри високий рівень безпеки, органічне виробництво має специфічні екологічні ризики. Через відмову від хімічних фунгіцидів, за несприятливих погодних умов під час збирання врожаю зростає ризик ураження рослин мікроскопічними грибами та накопичення мікотоксинів. Крім того, існує ризик транскордонного забруднення пестицидами або ГМО-пилком з сусідніх промислових полів, що вимагає створення навколо органічних угідь широких захисних буферних зон.

1.3.4. Порівняльна характеристика систем агровиробництва

Основні відмінності між системами землеробства та їх вплив на якісні характеристики кінцевої продукції наведено у таблиці 2.

Таблиця 2 - Екологічна оцінка та якісні характеристики продукції різних систем землеробства

Параметр оцінки	Промислове господарство	Системи з біологічним захистом (інтегровані)	Сертифіковане органічне виробництво
Залишки синтетичних пестицидів	Високий ризик; виявлення системних діючих речовин та їх метаболітів.	Мінімальний ризик; виявлення поодиноких залишків на межі виявлення приладами.	Виключено (повна заборона використання синтетичних пестицидів).
Акумуляція нітратів (NO ₃ ⁻)	Максимальний рівень; висока ймовірність перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК).	Помірний, контрольований рівень за рахунок оптимізації доз добрив.	Мінімальний рівень (природне азотне живлення через мінералізацію органіки).
Накопичення важких металів (Cd, Pb)	Високий ризик через внесення неочищених фосфатів та підкислення ґрунту.	Низький ризик; постійний контроль стану ґрунтового вбираючого комплексу.	Мінімальний ризик; заборонені кислі мінеральні та неочищені добрива.
Концентрація мікронутрієнтів (Fe, Zn, Mg, Se)	Низька; яскраво виражений “ефект розбавлення” через форсований ріст біомаси.	Середня; близька до фізіологічної норми рослини.	Висока (на 20–40% вища за аналоги при промисловому виробництві завдяки мікоризі).
Вміст антиоксидантів та поліфенолів	Низький; рослини у штучних хімічних умовах знижують синтез захисних молекул.	Помірний; близький до природного рівня адаптації.	Максимальний (рослини активно синтезують захисні метаболіти для самооборони).

Ризик забруднення мікотоксинами	Низький; контролюється регулярним профілактичним внесенням фунгіцидів.	Низький; хімічні фунгіциди заміщуються біопрепаратами та ентомофагами.	Помірний та підвищений; потребує суворого дотримання технології сушіння та зберігання.
Наявність ГМО-компонентів	Дозволено (згідно з національними реєстрами та законодавством).	Обмежено; регулюється стандартами безпеки конкретної країни.	Категорично заборонено на всіх етапах виробничого ланцюга.

Проаналізувавши агроекологічні чинники формування безпеки харчової сировини можна зробити наступні висновки:

1. Стан ґрунтового середовища безпосередньо визначає хімічний склад сільськогосподарських культур. Антропогенна деградація орних земель, глибока оранка та масове застосування фунгіцидів руйнують структуру ґрунту і знищують корисний мікробіом зокрема, мікоризу. Без природного симбіозу з грибами та ризосферними бактеріями рослини втрачають здатність ефективно засвоювати залізо, цинк, магній та селен з мікропор.

2. Форсоване підживлення високими дозами синтетичних азотних добрив (NPK) штучно стимулює стрімкий ріст вегетативної маси рослин, проте темпи накопичення сухих речовин, вітамінів та мікроелементів відстають від росту тканин із переважанням гідратних форм і крохмалю над есенціальними мікронутрієнтами, що в підсумку формує дефіцитні стани у структурі харчування населення.

3. Глобальні кліматичні зміни запускають каскад деструктивних процесів:

- зростання концентрації CO₂ знижує вміст білка та мікроелементів у зерні на 10–15%.
- температурний і водний стрес (посуха) блокують роботу ферменту нітратредуктази, що призводить до небезпечної акумуляції нітратів у вегетативних органах рослин.
- зміщення кліматичних зон на північ стимулює міграцію токсикогенних грибів роду *Aspergillus*, унаслідок чого в помірних широтах реєструють канцерогенний афлатоксин B1 у врожаї кукурудзи та соняшнику, який згодом трансформується в афлатоксин M1 у молоці.

4. Екологічна оцінка кінцевої продукції виявляє суттєві розбіжності між моделями господарювання. *Промислове землеробство* супроводжується високим ризиком накопичення залишків пестицидів, нітратів та важких металів (Cd²⁺, Pb²⁺). *Інтегрований захист (IPM)* виступає ефективною компромісною моделлю, яка мінімізує пестицидне навантаження завдяки біологізації контролю шкідників. *Сертифіковане органічне виробництво* за стандартами ЄС забезпечує абсолютну хімічну чистоту та вищу на 20-40% концентрацію есенціальних мікронутрієнтів та антиоксидантів, хоча й потребує посиленого контролю ризиків ураження мікотоксинами за несприятливих погодних умов.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Який біохімічний механізм дії сидерофорів забезпечує хелатування та мобілізацію важкорозчинних сполук Fe³⁺ і Zn²⁺ у ризосфері?

2. Які екологічні чинники інтенсивного землеробства призводять до деградації ґрунтового мікробіому?
3. Чому форсований вегетативний приріст біомаси за високих доз N призводить до зниження питомої концентрації вітамінів та антиоксидантів (ефект дилуції)?
4. Чому хронічний дефіцит заліза, цинку та селену в харчових продуктах отримав у медичній екології назву “прихований голод”, і які патологічні наслідки для здоров'я людини він викликає?
5. Опишіть біохімічні причини підвищення рухливості та біоактивності токсичних важких металів (Cd^{2+} , Pb^{2+} , Al^{3+}) у ґрунті під впливом фізіологічно кислих азотних добрив.
6. У чому полягає парадокс впливу підвищених концентрацій атмосферного CO_2 на нутритивний профіль сільськогосподарських культур за даними експериментів технології FACE (Free-Air Carbon Dioxide Enrichment)?
7. Опишіть фізіологічний механізм накопичення нітратів (NO_3^-) у рослинах під час посухи. Яку роль у цьому процесі відіграє фермент нітратредуктаза?
8. Простежте трофічний ланцюг біотрансформації афлатоксину B1 фуражного зерна в афлатоксин M1 молочної продукції.
9. Проведіть порівняльний аналіз промислового, інтегрованого та сертифікованого органічного землеробства за показниками вмісту пестицидів, нітратів та біологічно активних антиоксидантів у кінцевій продукції.
10. Чому в сертифікованому органічному землеробстві за умов відмови від синтетичних засобів хімізації ризик забруднення продукції мікотоксинами за несприятливих погодних умов може бути помірно підвищеним, і якими методами його контролюють?

РОЗДІЛ 2

ХІМІЧНІ КСЕНОБІОТИКИ У ХАРЧОВИХ ЛАНЦЮГАХ

2.1. Пестицидне навантаження на продовольчу сировину

Пестициди є тією категорією забруднювачів, яку людина вносить у навколишнє середовище свідомо та цілеспрямовано для захисту врожаю від шкідливих організмів. Незважаючи на очевидні переваги для продовольчої безпеки, масове та часто одностороннє застосування пестицидів перетворило їх на глобальний екоотоксикологічний фактор забруднення харчових ланцюгів.

Екологічна безпека харчової продукції в контексті пестицидного навантаження визначається не лише фактом їх застосування, а насамперед поведінкою, стійкістю та механізмами трансформації їх залишків у системі “грунт - рослина - харчовий продукт”.

2.1.1. Класифікація пестицидів

Існує декілька класифікацій для розробки ефективних систем моніторингу залишків пестицидів, які базуються на різних критеріях.

1. *Класифікація за об'єктами застосування*

Це найбільш вживана класифікація в агроєкології, що визначає цільовий шкідливий організм, а саме:

- гербіциди - для боротьби з бур'янами.
- фунгіциди - для боротьби з грибковими хворобами рослин.
- інсектициди - для знищення комах-шкідників.
- акарициди - для боротьби з кліщами.
- нематодіциди - для знищення нематод (круглих червів).
- родентициди - для боротьби з гризунами.
- гігієнічні та гетеринарні пестициди - використовуються для дезінфекції тваринницьких приміщень, складів сировини та лікування тварин.

2. *Класифікація за хімічною структурою*

Цей критерій є ключовим для токсикології, оскільки визначає фізико-хімічні властивості препарату, його персистентність у довкіллі, шлях метаболізму та механізм токсичної дії на організм людини.

- *Хлорорганічні сполуки (ХОС)* наприклад, ДДТ, гексахлорциклогексан. Мають екстремально високу стійкість (десятиліття) та здатність до біоаккумуляції в жирових тканинах. Через високу екоотоксичність більшість ХОС заборонені міжнародними конвенціями, проте їхні залишки все ще фіксуються у ґрунтах та донних відкладах.

- *Фосфорорганічні сполуки (ФОС)* (наприклад, хлорпірифос). Мають високу гостру токсичність для ссавців та людини (діють як нейротоксини, блокуючи фермент ацетилхолінестеразу). Проте вони є менш стійкими у довкіллі (від кількох тижнів до місяців) і швидше розкладаються під дією вологи та температури. Використання хлорпірифосу в ЄС повністю заборонено через доведену нейротоксичну дію на нервову систему.

- *Синтетичні піретроїди* (наприклад, дельтаметрин, циперметрин). Є аналогами природних піретринів. Мають високу інсектицидну активність і помірну токсичність для ссавців (швидко метаболізуються в організмі), але є надзвичайно токсичними для водних організмів та бджіл.

- *Неоніотиноїди* (наприклад, імідаклоприд, тіаметоксам). Системні інсектициди нового покоління. Мають високу системну активність (проникають у тканини рослини) та тривалий захисний ефект. Є однією з головних причин масової загибелі бджіл (ефект колапсу бджолиних сімей).

3. *Класифікація за способом проникнення*

Контактні

Діють при безпосередньому контакті із зовнішніми покривами шкідника (комахи, гриби). Не проникають усередину рослинних тканин і зазвичай залишаються на шкірці плодів, через що їх легше змити або видалити механічно.

Системні

Поглинаються листям чи корінням рослини і транслюються по судинній системі. Створюють токсичну концентрацію в усіх частинах рослини, забезпечуючи тривалий захист. Головний екологічний ризик системних препаратів полягає в тому, що їхні залишки інтегруються в їстівні органи та частини (плоди, зерно), тому їх неможливо видалити звичайним поверхневим миттям.

4. *Класифікація за ступенем небезпечності*

В Україні вона регулюється державними санітарними правилами (ДСП 8.8.1.2.002-98), які поділяють пестициди на 4 класи на основі показника ЛД₅₀ (доза речовини, що викликає загибель 50% піддослідних тварин при введенні в шлунок):

- I клас (надзвичайно небезпечні): ЛД₅₀ становить менше 15 мг/кг для твердих речовин та менше 50 мг/кг для рідких форм.

- II клас (небезпечні): ЛД₅₀ у межах 15–50 мг/кг для твердих та 50–200 мг/кг для рідких форм.

- III клас (помірно небезпечні) - ЛД₅₀ у межах 51–500 мг/кг для твердих та 201–2000 мг/кг для рідких форм.

- IV клас (малонебезпечні): ЛД₅₀ понад 500 мг/кг для твердих та понад 2000 мг/кг для рідких форм препаратів.

2.1.2. Поведінка залишків пестицидів у довкіллі та їх міграція у рослини

Після обробки поля пестицид починає взаємодіяти з навколишнім середовищем і його подальший шлях визначає, чи потрапить він у кінцевий продукт харчування.

Ґрунт є основним накопичувачем пестицидів. Опинившись у ґрунті, препарат підпорядковується двом основним процесам: адсорбції та деградації.

Адсорбція – це процес, за якого пестициди поглинаються часточками ґрунту. У ґрунтах із високим вмістом гумусу та глини цей процес відбувається дуже інтенсивно. З одного боку, це добре, бо зв'язаний пестицид не вимивається у ґрунтові води. З іншого боку,

міцно зв'язані речовини розкладаються набагато повільніше і стають джерелом вторинного забруднення наступних культур у сівозміні через кілька років.

Деградація - природне очищення ґрунту, яке відбувається декількома шляхами:

- *Мікробіологічний розпад* є найважливішим шляхом. Ґрунтові бактерії та гриби використовують молекули пестицидів як джерело живлення та енергії, розщеплюючи їх.
- *Хімічний розпад (гідроліз)* - руйнування препарату під дією ґрунтової вологи та рівня кислотності (рН).
- *Фотоліз* - розпад під впливом сонячного світла на поверхні ґрунту чи листя.
- *Утворення метаболітів* - під час розпаду пестициди перетворюються на нові речовини (метаболіти). Іноді ці метаболіти виявляються стійкішими та токсичнішими за сам вихідний препарат. Тому екологічний контроль має відстежувати не лише сам пестицид, а й продукти його розпаду.

Рослини поглинають пестициди двома шляхами, а саме адсорбують через коріння або через листя.

Розчинені у ґрунтовій воді пестициди всмоктуються корінням разом із корисними мікроелементами. Легкість цього процесу залежить від ліпофільності молекули, тобто здатності речовини розчинятися в жирах клітинних мембран.

Контактні препарати осідають безпосередньо на шкірці плодів або листі під час обприскування. Потрапивши всередину рослини, пестицид піддається її внутрішньому очищенню - метаболізму. Рослинні ферменти намагаються знешкодити чужорідну молекулу, а саме зв'язати її з цукрами чи білками та відправити у клітинні оболонки або вакуолі.

Час, за який рослина повністю знешкоджує пестицид до безпечного рівня, називають *терміном очікування*, це кількість днів від останньої обробки до збирання врожаю. Якщо аграрії порушують цей термін і збирають урожай раніше, залишки отрутохімікатів потрапляють у їжу в концентраціях, що перевищують максимально допустимий рівень (МДР).

2.1.3. Поняття про сумарний ефект малих доз

Токсикологічна оцінка, на основі якої державні органи встановлюють безпечні нормативи, як правило вивчає дію лише одного конкретного пестициду. На основі експериментів спочатку визначають дозу, яка не викликає негативних наслідків у тварин і ділять її на коефіцієнт безпеки, отримуючи допустиму добову дозу (ДДД) для людини. На базі ДДД з урахуванням структури раціону харчування розраховують МДР для кожного окремого продукту.

Проте, в реальних умовах агроєкологічна ситуація є складнішою. Протягом сезону поле обробляють різними сумішами препаратів від 5 до 15 разів. Як наслідок, у готовому продукті (наприклад, у свіжих ягодах чи салаті) лабораторія може виявити залишки кількох різних пестицидів одночасно. Навіть якщо вміст кожного з них окремо не перевищує норму, їхнє спільне перебування створює сумарний ефект.

Комбінована токсична дія полікомпонентних залишків реалізується через три ключові механізми: адитивність, синергізм та ендокринне руйнування.

Адитивність або додавання, коли в організм потрапляють кілька пестицидів з однієї хімічної групи або з однаковим типом дії. Їхня токсичність додається, і сумарний ефект може викликати отруєння, хоча кожен препарат окремо був у безпечній концентрації.

Синергізм або взаємне посилення - найнебезпечніший сценарій, коли присутність однієї речовини різко посилює токсичність іншої. Наприклад, деякі фунгіциди можуть блокувати в печінці ферменти захисту цитохроми, через що організм втрачає здатність знешкоджувати інсектициди, і їхня токсична дія зростає у десятки разів.

Ендокринне руйнування - багато пестицидів у мікродозах діють як ендокринні дизраптори. Вони імітують гормони людини або блокують рецептори до них. Спільна дія такого коктейлю може призвести до збоїв у роботі ендокринної, репродуктивної та імунної систем, навіть якщо всі компоненти формально перебували в межах МДР.

Тому сучасна екологічна безпека вимагає поступового переходу від контролю поодиноких речовин до оцінки загального токсичного навантаження пестицидних сумішей у раціоні людини.

2.1.4. Екологічна дискусія навколо використання гліфосату

Найпопулярнішим у світі гербіцидом суцільної дії, який знищує всі рослини без винятку, є гліфосат, а найвідоміший препарат на його основі – “Раундап”. Його використовують для очищення полів перед посівом, для десикації, тобто підсушування зернових перед збором врожаю, а також на посівах генетично модифікованих культур (соя, кукурудза), які мають штучну стійкість до цього гербіциду.

Навколо безпеки гліфосату точиться запекла міжнародна наукова та політична дискусія.

Аргумент прихильників, тобто виробників та аграріїв

Гліфосат - це діюча речовина найпоширеніших гербіцидів суцільної дії. Він знищує рослини, блокуючи шікіматний шлях, важливий метаболічний ланцюжок, за допомогою якого рослини синтезують життєво необхідні ароматичні амінокислоти. Оскільки у тварин і людини цього шікіматного шляху та відповідного ферменту немає, гліфосат тривалий час позиціонувався як абсолютно безпечний для здоров'я людей.

Аргумент опонентів (екологів та ВООЗ)

У 2015 році Міжнародне агентство з вивчення раку класифікувало гліфосат як “імовірний канцероген для людини (Група 2А)” на основі даних про підвищення ризику онкологічних захворювань лімфатичної системи у людей, які безпосередньо працюють із препаратом.

Хоча організм людини дійсно не має шікіматного шляху, цей шлях є основою життєдіяльності багатьох бактерій нашого кишкового мікробіому. Потрапляючи в організм із їжею, залишки гліфосату пригнічують корисну мікрофлору шлунково-кишкового тракту, що може провокувати хронічні запальні процеси та імунні порушення.

Гліфосат є системним препаратом. Він накопичується в зерні пшениці, вівсі, сої та соняшнику. Сьогодні його залишки та залишки його стійкого продукту розпаду амінометилфосфонові кислоти часто фіксуються лабораторіями у хлібобулочних виробах, питній воді та навіть пиві.

Попри попередження ВООЗ, національні агенції безпеки їжі США (ЕРА) та Європи (EFSA) на основі звітів хімічних компаній продовжують стверджувати, що за умов суворого дотримання інструкцій гліфосат не становить загрози. Проте через екологічний тиск та занепокоєння споживачів багато країн ЄС уже відновлюють або вводять жорсткі обмеження на його застосування (наприклад, забороняють обробку полів безпосередньо перед збиранням врожаю).

2.2. Важкі метали та металоїди

Важкі метали та металоїди належать до категорії найбільш небезпечних ксенобіотиків. На відміну від органічних забруднювачів, наприклад, пестицидів, які з часом піддаються біологічному чи хімічному розпаду до безпечних сполук, важкі метали є неруйнівними елементами. Потрапляючи в агроecosистеми внаслідок техногенної діяльності людини, вони назавжди залишаються у біосфері, циклічно мігруючи між ґрунтом, водою, повітрям та живими організмами, і накопичуються у кінцевих ланках харчових ланцюгів.

2.2.1. Загальні закономірності міграції та накопичення у трофічних ланцюгах

Поведінка важких металів у харчових ланцюгах підпорядковується загальним екологічним законам біогеохімічного колообігу, проте має свої специфічні особливості.

Біоаккумуляція - процес накопичення токсиканта в організмі у концентраціях, що перевищують його вміст у навколишньому середовищі, в тому числі у ґрунті і воді. Особливо інтенсивно цей процес перебігає у довгоживучих організмах та тканинах із повільним метаболізмом (кістки, нирки, печінка).

Біомагніфікація або біологічне посилення - явище, за якого концентрація токсиканта у тканинах живих організмів зростає в геометричній прогресії в міру просування вгору по трофічних ланках від продуцентів до консументів вищих порядків. На вершині цієї екологічної піраміди перебуває людина, яка отримує максимальну інтегральну дозу забруднювача.

Фізіологічна мімікрія або іонна аналогія - головна біохімічна підступність важких металів та металоїдів полягає в тому, що їхні іони за своїми фізико-хімічними характеристиками, такими як радіус іона, заряд, координаційне число дуже схожі на життєво необхідні есенціальні мікроелементи. Рослинні та тваринні клітини плутають токсичні іони з корисними і активно транспортують їх всередину організму через наявні клітинні канали.

Наприклад:

Іон кадмію Cd^{2+} мімікрує під есенціальний цинк Zn^{2+} та кальцій Ca^{2+} .

Іон свинцю Pb^{2+} є біохімічним аналогом кальцію Ca^{2+} .

Арсенат-іон AsO_4^{3-} хімічно мімікрує під фосфат-іон PO_4^{3-} , що дозволяє йому вбудовуватись в реакції синтезу АТФ.

2.2.2. Джерела надходження та особливості накопичення пріоритетних токсикантів

У міжнародній практиці контролю безпеки харчових продуктів виділяють чотири найбільш небезпечні елементи: Ртуть, Кадмій, Свинець та Арсен.

Важкі метали у харчових ланцюгах

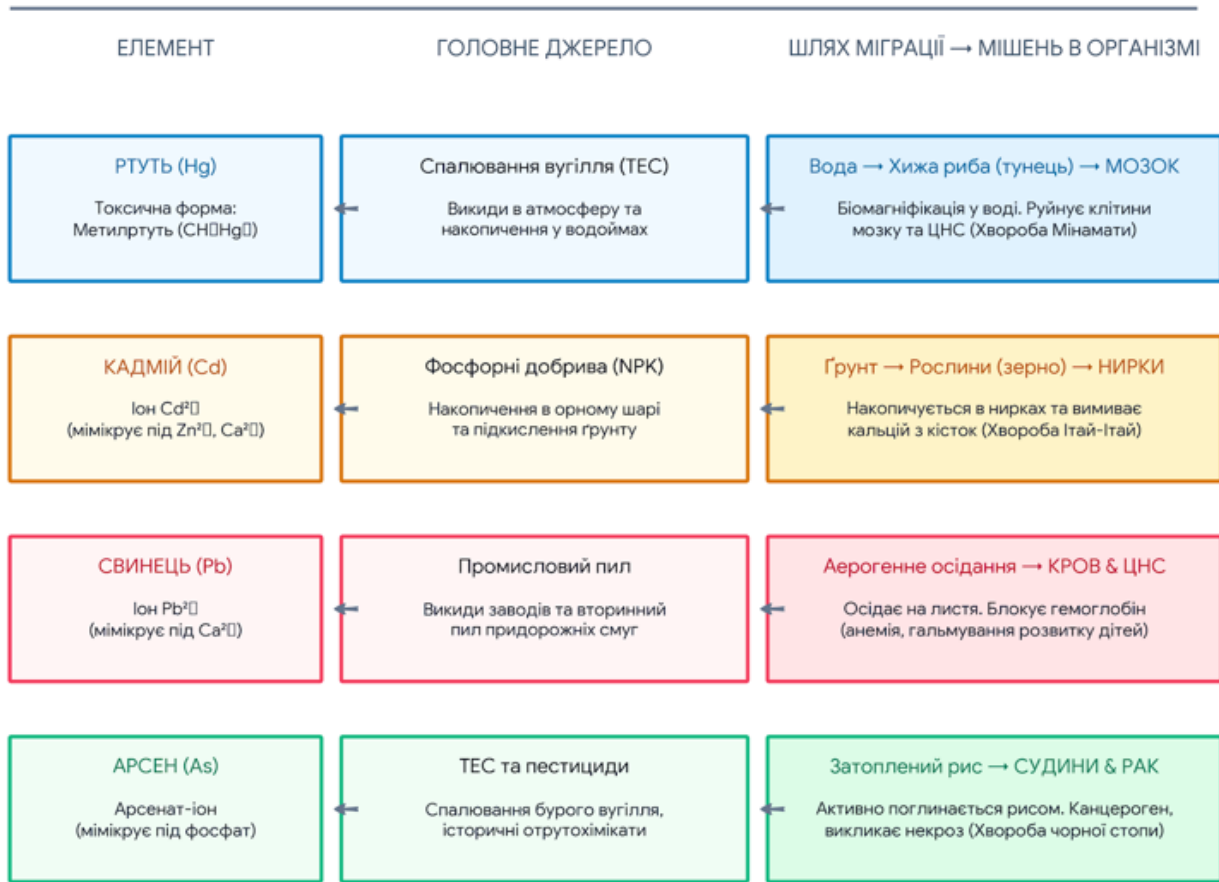


Рис. 2 . Схема переміщення важких металів у харчових ланцюгах.

1. Ртуть (Hg)

Ртуть - унікальний рідкий метал із високою летючістю.

Джерела надходження в агросферу: викиди теплових електростанцій при спалюванні вугілля, металургійні підприємства, хімічні виробництва, а також історичне використання ртутьорганічних пестицидів, які застосовуються як протруйники насіння.

Потрапляючи у водойми з опадами та аероерозією, неорганічна ртуть Hg^{2+} під дією донних анаеробних бактерій проходить процес біометилування і перетворюється на надзвичайно токсичну органічну сполуку - метилртуть CH_3Hg^+ .

Метилртуть є ліпофільною речовиною, що добре розчиняється в жирах, тому вона миттєво поглинається фітопланктоном, передається зоопланктону і далі по ланцюгу живлення накопичується у м'язах риби. У хижих довгоживучих риби (тунець, акула, риба-меч) концентрація метилртути може бути у тисячі раз більше, ніж у воді.

Вживання такої риби є головним шляхом отруєння людини ртуттю. Метилртуть легко долає гематоенцефалічний бар'єр, вражаючи центральну нервову систему, класичним прикладом є хвороба Мінамати.

2. Кадмій (Cd)

Кадмій - один із найбільш рухливих та небезпечних металів у системі "ґрунт – рослина".

Джерела надходження в агросферу: систематичне внесення мінеральних фосфорних добрив, виготовлених із фосфоритів, які містять кадмій як природну домішку, викиди сміттєспалювальних заводів та зношування автомобільних шин, так як при вулканізації гуми використовується цинк із домішками кадмію.

Іон кадмію Cd^{2+} активно поглинається корінням через мембранні транспортери, призначені для цинку та кальцію. Процес різко посилюється на кислих ґрунтах ($\text{pH} < 5.5$), де кадмій переходить у високорухливі іонні форми.

Кадмій накопичується у зерні пшениці, насінні соняшнику, листових овочах, таких як салат, шпинат та грибах. В організмі тварин, які споживають такі корми, кадмій акумулюється у бар'єрних органах - нирках та печінці.

Кадмій є кумулятивною отрутою з періодом напіввиведення з організму людини понад 10–20 років. Він накопичується в нирках, викликаючи хронічну ниркову недостатність, а також вимиває кальцій із кісток, спричиняючи остеопороз та деформацію скелета (хвороба Ітай-Ітай).

3. Свинець (*Pb*)

Свинець малорухливий у ґрунтовому профілі і надійно затримується кореневим бар'єром рослин.

Головне джерело забруднення агросфери сьогодні — це промислові викиди та вторинне підняття вітром (ресуспензія) історично накопиченого пилу в придорожніх смугах.

У ґрунті свинець міцно зв'язується гумусом і є малорухливим. Коріння рослин зазвичай затримує свинець у своїх оболонках, задіюючи кореневий бар'єр. Тому головним шляхом забруднення рослин свинцем є аерогенний шлях - безпосереднє осідання промислового пилу та смогу на поверхню листя та плодів уздовж автошляхів та поблизу металургійних підприємств.

Потрапляючи в організм сільськогосподарських тварин з кормом, іон свинцю заміщує кальцій у кістковій тканині. Близько 90% усього свинцю в організмі тварин депонується у кістках, проте при стресових станах, лактації або вагітності він може вимиватися у кров і переходити у молоко та м'язову тканину.

Для людини свинець є потужним нейротоксином, який гальмує розумовий розвиток дітей та блокує синтез гемоглобіну, викликаючи анемію та пошкоджує нирки.

4. Арсен (*As*)

Арсен (миш'як) є металоїдом, тобто елементом, що поєднує властивості металів та неметалів.

Джерела надходження в агросферу: історичне використання арсеновмісних пестицидів (арсенату натрію), спалювання бурого вугілля на ТЕС, геотермальні джерела та стічні води деяких виробництв.

Особливе місце в екології Арсену займає вирощування рису. Рис вирощують на затоплюваних полях, де у безкисневих (анаеробних) умовах Арсен переходить у рухливу відновлену форму - арсеніт. Рослини рису активно поглинають арсеніт через транспортери кремнієвої кислоти, накопичуючи його у зерні в концентраціях, що до 10 разів перевищують вміст у інших злаках.

Важливо розрізняти хімічні форми елемента. *Неорганічний Арсен* (арсеніти та арсенати) є надзвичайно токсичним і офіційно визнаним канцерогеном першого класу.

Органічні форми (арсенобетаїн та арсенохолін), які накопичуються у морській рибі та креветках, є практично нетоксичними для людини і швидко виводяться з сечею.

Неорганічний Арсен викликає системні ураження судин, гіперкератоз шкіри та суттєво підвищує ризик розвитку онкологічних захворювань легень, сечового міхура та шкіри.

2.2.3. Особливості міграції по трофічних ланцюгах

Є два основні екологічні бар'єри, які регулюють рух важких металів у харчових ланцюгах агроєкосистем.

Грунтово-рослинний бар'єр - захисний механізм, який обмежує транзит токсикантів з ґрунту в рослину. Наприклад, якщо ґрунт має нейтральну або лужну реакцію ($\text{pH} > 7$) та високий вміст гумусу, метали переходять у нерозчинні карбонати чи гумати, стаючи недоступними для коріння. Рослини також мають власні механізми захисту - ферментативним шляхом синтезують з глутатіону специфічні олігопептиди, які зв'язують важкі метали у клітинах коріння у нетоксичні комплекси, перешкоджаючи їхньому подальшому транспорту в листя та плоди.

Рослинно-тваринний бар'єр - тваринний організм має потужні системи детоксикації (бар'єрна функція печінки та видільна функція нирок), які зв'язують і виводять важкі метали, обмежуючи їх потрапляння у м'язову тканину. Проте при хронічному та критичному рівні забруднення кормів цей бар'єр руйнується.

2.2.4. Державне нормування та екологічний моніторинг

Через високу небезпеку важких металів їхній вміст у продуктах харчування суворо регламентується державними та міжнародними стандартами.

В Україні контроль здійснюється відповідно до Державних гігієнічних правил і норм, які встановлюють Гранично допустимі концентрації (ГДК) або Максимально допустимі рівні (МДР) металів у сировині та продуктах.

У країнах Європейського Союзу діє Регламент Комісії (ЄС) 2023/915, який встановлює єдині суворі нормативи для кадмію, свинцю, ртуті та неорганічного арсену в різних категоріях харчових продуктів, окремо виділяючи дитяче харчування, де нормативи є максимально жорсткими.

Основними методами моніторингу важких металів у лабораторіях харчової безпеки є сучасні спектрометричні методи: атомно-абсорбційна спектрометрія (ААС) та мас-спектрометрія з індуктивно-зв'язаною плазмою, які дозволяють виявляти мікроскопічні ультраслідові кількості токсикантів у кожній партії продовольства.

2.3. Стійкі органічні забруднювачі та “вічні хімікати” (PFAS)

Поряд із важкими металами та залишками пестицидів, особливу загрозу для екологічної безпеки харчових продуктів становить велика група повністю синтетичних, штучно створених людиною ксенобіотиків. Серед них провідне місце за ступенем екотоксикологічної небезпеки посідають стійкі органічні забруднювачі (СОЗ) та пер- і поліфторалкільні речовини (PFAS), відомі у науковій літературі як “вічні хімікати” (*forever chemicals*).

Особливістю цих сполук є їхня екстремальна хімічна стійкість, здатність до транскордонного перенесення на тисячі кілометрів від джерела викиду та виражені кумулятивні властивості, що веде до їхнього постійного накопичення у трофічних ланцюгах людини.

2.3.1. Стійкі органічні забруднювачі (СОЗ)

Стійкі органічні забруднювачі (СОЗ) - це персистентні органічні сполуки галогенового походження (переважно хлоровані вуглеводні), які мають високу токсичність, чинять мутагенну, канцерогенну та ендокринну дію на живі організми.

З метою глобального обмеження та повної ліквідації виробництва цих сполук у 2001 році було підписано, а в 2004 році введено в дію Стокгольмську конвенцію про стійкі органічні забруднювачі. Україна ратифікувала цю конвенцію 25 вересня 2007 року (Закон № 1514-V). Початковий список конвенції включав так звану “брудну дюжину” (*dirty dozen*) сполук, які за функціональним призначенням поділяються на три категорії:

1. Хімічні засоби захисту рослин (пестициди).
2. Промислові хімікати: поліхлоровані біфеніли (ПХБ) - речовини, які масово використовувалися як діелектрики у трансформаторах та пластифікатори у фарбах і лаках.
3. Ненавмисні викиди (побічні продукти промислових процесів): поліхлоровані дибензо-п-діоксини (ПХДД) та поліхлоровані дибензофурані (ПХДФ). Вони утворюються як побічні продукти при спалюванні побутового сміття, хлоруванні води та вибілюванні целюлози хлором.

Сучасна екотоксикологія більше не розглядає класичні СОЗ та PFAS як абсолютно відокремлені групи. Ключові представники PFAS через їхню надзвичайну небезпеку вже офіційно інтегровані до додатків Стокгольмської конвенції про СОЗ як промислові забруднювачі.

Екологічні властивості СОЗ:

Період напіврозпаду СОЗ у ґрунті та воді становить десятиліття. Вони стійкі до фотолізу, хімічного окиснення та мікробіологічного руйнування. СОЗ практично не розчиняються у воді, але дуже добре розчиняються в жирах, що зумовлює їхнє накопичення у жировій тканині тварин і людини.

Через помірну летючість СОЗ випаровуються у теплих регіонах планети, переносяться повітряними масами у вищі широти, де конденсуються і випадають з опадами у холодних зонах (Арктика, Антарктика). Через це тканини полярних тварин (білих ведмедів, тюленів) часто містять концентрації ДДТ та ПХБ, що перевищують норми у тисячі разів, попри відсутність там промисловості.

2.3.2. Пер- та поліфторалкільні речовини (PFAS) як новий екологічний виклик

Пер- та поліфторалкільні речовини (PFAS) - це родина, що налічує понад 10 000 синтетичних фторорганічних сполук, які використовуються в промисловості та побуті з 1940-х років. Найбільш вивченими представниками цього класу є перфтороктансульфонова кислота (PFOS) та перфтороктанова кислота (PFOA).

Біохімічні особливості PFAS

Молекула PFAS складається з ланцюжка атомів Вуглецю, повністю заміщених атомами Флуору. Зв'язок Вуглець-Флуор C–F є одним із найміцніших одинарних зв'язків в органічній хімії. Жоден природний фермент бактерій чи рослин не здатний розірвати цей зв'язок у природних умовах, що робить PFAS практично неруйнівними у біосфері. PFAS мають амфіфільну структуру. Фторований вуглецевий хвіст є водночас гідрофобним, тобто відштовхує воду та ліпофобним, тобто відштовхує жири та олії, а термінальна група (голова) є гідрофільною. Це дозволяє використовувати їх для створення антипригарного покриття, такого як тефлону, водонепроникних мембранних тканин (Gore-Tex), вогнегасних пін та жиростійкого харчового пакування.

На відміну від класичних CO₂, наприклад, ДДТ чи ПХБ, які депонуються виключно в жировій тканині, PFAS мають високу спорідненість до білків. Вони зв'язуються з сироватковим альбуміном крові та накопичуються у багатих на білок органах - печінці, нирках та м'язовій тканині. Через це PFAS швидко поширюються по всьому організму і мають значно ширший спектр токсичної дії.

2.3.3. Шляхи циркуляції синтетичних сполук у природному середовищі

Завдяки своїй стійкості, штучні органічні ксенобіотики утворюють складні глобальні та локальні шляхи циркуляції в навколишньому середовищі.



Рис. 3. Шляхи циркуляції синтетичних сполук у природному середовищі

Первинними джерелами PFAS є заводи з виробництва фторполімерів, використання вогнегасних пін на військових полігонах та аеропортах, а також вилуговування зі звалищ побутових відходів. На відміну від нерозчинних CO₂, PFAS, особливо коротколанцюгові є

помірно розчинними у воді, що дозволяє їм легко мігрувати крізь ґрунтові фільтри у глибокі водоносні горизонти. Муніципальні очисні споруди не здатні затримувати чи руйнувати PFAS та СОЗ. Очищена вода скидається у річки, які використовуються для зрошення полів, а активний мул очисних споруд, багатий на органіку, часто використовується фермерами як дешеве азотно-фосфорне добриво. Це призводить до масштабного прямого забруднення сільськогосподарських угідь.

ПХБ та довголанцюгові PFAS адсорбуються на мікрочастинках пилу і разносяться вітром на величезні відстані, випадаючи з дощем на пасовища та орні землі далеко від індустріальних центрів.

Шляхи надходження “вічних хімікатів” та СОЗ до споживчого кошика людини є диверсифікованими і охоплюють усі ланки агропродовольчого ланцюга.

Через високу рухливість у водному середовищі та стійкість до стандартних методів водопідготовки (хлорування, озонування, піщані фільтри), PFAS проникають у комунальні водопроводи та артезіанські свердловини. Видалити їх з питної води на очисних станціях можливо лише за допомогою дороговартісних технологій: сорбції на активованому вугіллі, використання іонообмінних смол або зворотного осмосу.

Рослини активно всмоктують коротколанцюгові PFAS разом із ґрунтовою вологою. Токсиканти накопичуються у вегетативній масі, наприклад у листі салату, шпинату, а також у плодах та зернових культурах. Біоконцентраційний фактор (BCF) для рослин на забруднених ґрунтах може коливатися від 2 до 50, залежно від довжини вуглецевого ланцюга сполуки (коротші ланцюги поглинаються значно легше). Сільськогосподарські тварини одержують СОЗ та PFAS з питною водою та кормами (вирощеними на забруднених мулах або зрошуваних полях). Через високу спорідненість до білків та ліпідів, ці речовини концентруються в організмі тварин. СОЗ (наприклад, діоксини) накопичуються у жирових депо, виділяючись у значних кількостях з вершковим маслом, молоком та салом. PFAS накопичуються в м'ясі (яловичині, свинині), а також у курячих яйцях.

Водні ланцюги живлення є критичною зоною накопичення. Коефіцієнт біомагніфікації PFOS у ланці “вода → хижа риба” досягає доволі високих значень. Річкова та озерна риба, виловлена поблизу промислових зон чи військових об'єктів, є одним із найпотужніших джерел надходження PFAS в організм людини.

Важливим і безпосереднім джерелом забруднення готової їжі є її пакування. PFAS використовуються для надання паперу та картону водовідштовхувальних та жиростійких властивостей. Вони містяться у коробках для піци, паперових склянках для кави, обгортках для фастфуду та пакетах для попкорну. При контакті з гарячою та жирною їжею PFAS інтенсивно мігрують безпосередньо в готовий продукт, який споживає людина.

2.3.4. Токсикологічний вплив

Для PFAS характерна дуже повільна швидкість виведення з організму людини. Період напіввиведення $T_{1/2}$ з крові людини для PFOA становить близько 3 – 5 років, а для PFOS – понад 5–8 років. Через це навіть надходження ультраслідових кількостей сполук з водою та їжею призводить до їхнього прогресуючого накопичення в органах.

Наслідки хронічного впливу на здоров'я людини

PFAS та СОЗ діють як гормональні руйнівники. Вони блокують роботу щитоподібної залози, порушують регуляцію інсуліну та знижують рівень тестостерону у чоловіків. Доведено, що високі концентрації PFAS у крові дітей суттєво знижують ефективність стандартної вакцинації через пригнічення синтезу антитіл. Вони також викликають зниження фертильності, недоношеність вагітності та вади розвитку плода.

Міжнародне агентство з вивчення раку класифікує PFOA як Групу 1- канцерогенний для людини, безпосередньо пов'язану із виникненням раку нирок та яєчок. Натомість PFOS класифіковано як Групу 2B - можливо канцерогенний для людини.

Через доведену небезпеку, світові стандарти безпеки питної води та харчових продуктів зазнали радикальних змін.

В Європейському Союзі згідно з новою Директивою про питну воду (EU 2020/2184) встановлено жорсткий ліміт: сума 20 ключових PFAS у питній воді не повинна перевищувати 0.1 мкг/л (100 нг/л).

Регламентом Комісії (ЄС) 2022/2388 встановлено максимально допустимі рівні (МДР) вмісту PFOS, PFOA, PFHxS та PFNA в м'ясі, рибі, ракоподібних та яйцях.

Основним методом лабораторного контролю PFAS у харчових продуктах є високоефективна рідинна хроматографія з мас-спектрометрією надвисокої роздільної здатності.

2.4. Мікро- та нанопластик як новий екологічний виклик

Швидке зростання світового виробництва синтетичних полімерів призвело до виникнення нової глобальної екотоксикологічної загрози - забруднення біосфери мікро- та наночастинками пластику. Раніше пластикові відходи розглядали переважно як естетичну проблему або фактор механічного травмування диких тварин, проте сьогодні дрібнодисперсний пластик розглядається як небезпечний фізико-хімічний ксенобіотик. Завдяки своїм мікроскопічним розмірам ці частинки здатні проникати крізь біологічні бар'єри рослин і тварин, акумулюватися в органах та тканинах і мігрувати по трофічних ланцюгах, створюючи реальні загрози для здоров'я людини.

Прийнято наступну градацію полімерних частинок:

- Макропластик (> 20 мм) - великі фрагменти виробів (пляшки, пакети, пакування).
- Мезопластик (5-20 мм) - дрібні уламки виробів, залишкові фрагменти.
- Мікропластик (1 мкм -5 мм) - частинки, що легко заковтуються дрібними організмами та проникають у травні тракти.
- Нанопластик (< 100 нм) - колоїдні частинки, які за розмірами співрозмірні з біомакромолекулами і здатні до клітинного ендоцитозу та міграції судинними системами рослин і тварин.

-

Первинний мікропластик - частинки, які спеціально виробляють у мікроскопічному розмірі для промислового та побутового використання. Сюди належать пластикові гранули – пелети, тобто сировина для виробництва пластмас, а також мікросфери, які додають у косметичні засоби, такі як скраби, зубні пасти та пральні порошки.

Вторинний мікропластик - частинки, що утворюються безпосередньо у довкіллі внаслідок руйнування та фрагментації великих пластикових виробів. Головними чинниками фрагментації є ультрафіолетове випромінювання сонця - фотодеградація, механічне зношування через тертя та хімічне вивітрювання.

Найбільш масовими забруднювачами є полімери з високим обсягом світового виробництва: поліетилен (ПЕ), поліпропілен (ПП), полівінілхлорид (ПВХ), полістирол (ПС) та поліетилентерефталат (ПЕТ).

2.4.2. Поширення пластикових частинок у природних середовищах та агросистемах

Полімерні ксенобіотики характеризуються повсюдною присутністю - їх виявляють від глибоководних западин до снігів Антарктиди.

Водойми є кінцевим резервуаром для більшості пластикових відходів. Під дією океанічних течій мікропластик концентрується у так званих «сміттевих плямах», зокрема, у Великій тихоокеанській сміттевій плямі. Через різну щільність полімерів відбувається їхня вертикальна стратифікація: легкі полімери (ПЕ, ПП) плавають у приповерхневому шарі, тоді як важкі (ПВХ, ПЕТ) осідають на дно, забруднюючи донні відклади та стаючи доступними для донних організмів (бентосу).

Довгий час фокус досліджень був спрямований виключно на океан, проте останні дані агроекологічного моніторингу свідчать, що орні ґрунти містять у 4–23 рази більше мікропластику, ніж водні середовища.

Головними джерелами забруднення агросфери є наступні.

Практика мульчування плівкою

Систематичне використання поліетиленових плівок для покриття міжрядь, створення парників та силосних траншей. Під дією сонця та агротехнічних робіт плівки фрагментуються, перетворюючись на мільйони дрібних часток, які назавжди інтегруються в орний шар.

Внесення активного мулу очисних споруд

Оскільки мікропластик із пральних машин (синтетичні мікрОВОлокна поліестеру, нейлону) та засобів гігієни змивається у каналізацію, очисні споруди затримують до 90 -99% цих частинок у своїх осадах. Коли фермери використовують висушений активний мул як органічне добриво, вони несвідомо здійснюють масштабне забруднення власних полів мікропластиком.

Зношування автомобільних шин

Частинки протектора шин, що складаються з синтетичного каучуку та полімерних сумішей, змиваються з дощовою водою з автошляхів на прилеглі сільськогосподарські угіддя.

2.4.3. Механізми потрапляння та міграції у трофічних ланцюгах

Проникнення мікро- та нанопластику в продовольчу сировину відбувається через специфічні біологічні механізми в рослинних та тваринних організмах.



Рис. 4. Механізми міграції пластику у трофічних ланцюгах

Тривалий час вважалося, що рослини не здатні поглинати пластикові частинки через жорстку структуру клітинної стінки коріння, яка виконує роль механічного сита. Сучасні дослідження з використанням флуоресцентного маркування довели, що головним механізмом поглинання є шлях проникнення крізь мікротріщини. У місцях, де від головного кореня відгалужуються бічні корінці, клітинна структура зазнає механічного розтягування, утворюючи мікроскопічні тріщини на стиках клітин. Наночастинки пластику (< 100 нм), що перебувають у ґрунтовому розчині, проникають у ці тріщини.

Далі під дією транспіраційного току, тобто всмоктувальної сили випаровування води листям, нанопластик потрапляє до судин ксилеми і переноситься по всьому рослинному організму, накопичуючись у вегетативних органах, таких як листя салату, капусти та генеративних органах: плодах томатів, яблуках, зерні злаків.

У водних екосистемах мікропластик за розмірами та формою нагадує природний планктон. Його активно заковтують первинні консументи - зоопланктон, фільтруючі молюски (мідії, устриці) та дрібна риба. Далі по ланцюгу живлення токсикант переходить до хижих риб. Особливу небезпеку становлять двостулкові молюски, такі як мідії та устриці, оскільки людина споживає їх цілком, разом із травним трактом, де концентрується найбільша кількість невідфільтрованого мікропластику.

Потрапляючи в організм людини з їжею або водою, мікро- та нанопластик поведуться по-різному залежно від лінійних розмірів частинок.

Частинки розміром понад 150 мкм не здатні проникати крізь епітелій кишківника. Вони транзитом проходять через шлунково-кишковий тракт і виводяться з організму природним шляхом, справляючи лише локальний механічний та хімічний вплив на слизову оболонку.

Частинки розміром < 20 мкм мають здатність проникати крізь кишковий бар'єр у лімфатичні судини та системний кровотік завдяки процесу персорбції.

Наночастинки (< 100 нм) через свої ультрамалі розміри легко проходять через міжклітинні простори та поглинаються клітинами шляхом ендоцитозу. Вони безперешкодно долають найважливіші захисні фізіологічні бар'єри:

- *Гематоенцефалічний бар'єр* (проникають у тканини головного мозку).
- *Плацентарний бар'єр* (транспортуються в організм плода та накопичуються у навколоплідних водах).

2.4.5. Екотоксикологічні ризики

Токсичний вплив мікро- та нанопластику на живі організми та людину складається з декількох взаємопов'язаних факторів.



Рис. 5. Екотоксикологічні ризики пластику.

Фізичний або механічний фактор - накопичення твердих гострих частинок у тканинах викликає хронічне запалення слизових оболонок, пошкодження мікроросинок кишківника, клітинний стрес та утворення вільних радикалів, так званий окиснювальний стрес.

Хімічний фактор через міграцію добавок. Самі по собі промислові полімери є інертними молекулами, проте для надання пластику кольору, гнучкості чи стійкості до горіння, у процесі виробництва в нього додають велику кількість допоміжних сполук, а саме пластифікаторів, антипіренів, стабілізаторів тощо. Потрапляючи в організм, пластик починає виділяти фталати та бісфенол А (BPA), які руйнують гормональну систему, знижують фертильність та провокують розвиток гормонозалежних пухлин.

Пластикові частинки мають гідрофобну поверхню з великою питомою площею. Перебуваючи у забрудненому ґрунті чи воді, мікропластик діє як губка, тобто він активно адсорбує на своїй поверхні стійкі органічні забруднювачі (ДДТ, ПХБ, діоксини) та важкі метали. Концентрація цих токсикантів на поверхні пластику може бути в 10^6 разів вищою, ніж

у навколишньому середовищі, тож поглинаючи на перший погляд чисту частинку пластику, організм отримує висококонцентровану дозу накопичених на ній небезпечних екотоксикантів, які вивільняються безпосередньо всередині клітин.

2.4.6. Перспективи законодавчого регулювання та екологічні застереження

Зараз у світі відбувається формування законодавчої бази регулювання пластикового тиску на агросферу та продовольчий ринок.

В Європейському Союзі запроваджено обмеження на використання первинного мікропластику в косметичних засобах та побутовій хімії (Регламент ЄС 2023/2055).

Ведеться активна розробка біорозкладних полімерів (полігідроксіалканатів - PHA, полімолочної кислоти - PLA) на заміну традиційним пластиком.

Але критично важливо аналізувати заяви виробників пакування про екологічність. Багато так званих “біорозкладних” пластиків, зокрема, оксорозкладні пластики, насправді не піддаються біологічному розкладу мікроорганізмами. Під дією спеціальних добавок вони просто швидше фрагментуються під сонячним промінням на дрібні невидимі уламки. Це не вирішує проблему, а навпаки стрімко збільшує концентрацію небезпечного нанопластику в ґрунтах та поливних водах. Справжнє вирішення проблеми полягає в переході на полімери рослинного походження, здатні до повної мінералізації до вуглекислого газу та води у природному середовищі.

Узагальнюючи дані щодо міграції, трансформації та біоаккумуляції хімічних ксенобіотиків у харчових ланцюгах можна сформулювати наступні висновки.

1. Пестициди є єдиним класом ксенобіотиків, які людина свідомо вносить в агросферу. Їхня поведінка визначається конкуренцією між процесами адсорбції, тобто зв'язування ґрунтовим поглинальним комплексом та деградації, тобто мікробний, хімічний та фотолітичний розпад. Особливу загрозу для безпеки продовольства становлять системні препарати, які транслокуються судинною системою рослин у генеративні органи (зерно та плоди), унеможливаючи їх видалення шляхом кулінарної обробки. Будь-яке порушення регламентованих термінів очікування веде до перевищення максимально допустимих рівнів (МДР) у продуктах.

2. Оцінка безпеки продовольства на основі поодиноких МДР більше не є гарантією чистоти, тому що одночасна присутність мікродоз різних пестицидів у готовому продукті запускає механізми адитивності або підсумовування ефекту препаратів з одним типом дії; синергізму, коли одні речовини, наприклад фунгіциди, блокують захисні ферменти печінки - цитохроми, посилюючи токсичність інсектицидів у десятки разів та ендокринної деструкції, коли відбувається імітація або блокування гормональних рецепторів людини. Це потребує переходу до сумарного токсикологічного оцінювання сумішей ксенобіотиків.

3. Важкі метали є неруйнівними елементами, які підпорядковуються законам біоаккумуляції та біомагніфікації, тобто геометричного зростання концентрацій у вищих трофічних ланках і їхнє проникнення у біоту ґрунтується на явищі фізіологічної мімікрії.

4. Стійкі органічні забруднювачі (СОЗ), регульовані Стокгольмською конвенцією (ратифікована Україною 25 вересня 2007 року), є високоліпофільними речовинами, які накопичуються у жирових депо тварин (вершкове масло, молоко, сало). Натомість “вічні

хімікати” (PFAS) завдяки екстремально міцному зв'язку Вуглець-Флуор є практично неруйнівними, проте виявляють протеїнофільні властивості. Вони зв'язуються з альбуміном крові та накопичуються у білкових структурах (м'язовому волокні, печінці, нирках). Головними джерелами PFAS є забруднена питна вода, річкова риба та фторорганічне жиростійке пакування швидкої їжі.

5. Полімерне забруднення агросфери через зношування шин, агроплівки та мул очисних споруд суттєво перевищує забруднення океану. Нанопластик поглинається корінням рослин за допомогою шляху крізь мікротріщини у місцях відгалуження бічних корінців та мігрує по ксилемі у листя і плоди. В організмі людини нанопластик долає гематоенцефалічний та плацентарний бар'єри. Крім фізичного травмування тканин та міграції добавок, таких як фталати, бісфенол А, пластикові частинки сорбують на своїй гідрофобній поверхні СО₂ та важкі метали, доставляючи ці ксенобіотики безпосередньо у внутрішні органи у надконцентрованих дозах.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Охарактеризуйте цільову класифікацію пестицидів. У чому полягає принципова різниця в контексті екологічної безпеки харчування між контактними та системними препаратами?
2. Порівняйте поведінку, стійкість у довкіллі та біохімічні особливості хлорорганічних (ХОС) та фосфорорганічних сполук (ФОС). Чому використання хлорпірифосу повністю заборонене в країнах ЄС?
3. Які класи небезпечності (токсичності) пестицидів встановлені чинним українським законодавством (ДСП 8.8.1.2.002-98)? За якими критеріями ЛД₅₀ здійснюється цей поділ для твердих та рідких форм препаратів?
4. Опишіть домінуючі шляхи природного очищення (деградації) пестицидів у ґрунті. Чому екологічний моніторинг повинен контролювати не лише вихідні діючі речовини, а й їхні метаболіти?
5. Що таке “термін очікування” та “максимально допустимий рівень” (МДР) пестицидів? Які екологічні процеси відбуваються у рослині в цей період?
6. Розкрийте біохімічну суть впливу пестицидів на прикладах адитивності, синергізму та ендокринної деструкції. Яку роль у синергічній взаємодії відіграють ферменти цитохроми печінки?
7. Поясніть біохімічні аргументи прихильників та опонентів широкого використання гербіциду гліфосату. Яким чином системний гербіцид може впливати на імунну та травну системи людини, якщо в нашому організмі відсутній шікіматний шлях?
8. Що таке біоаккумуляція, біомагніфікація та фізіологічна мімікрія (іонна аналогія) важких металів? Розкрийте біохімічний механізм токсичної дії арсенат-іону через копіювання фосфат-іону.
9. Опишіть біогеохімічні особливості міграції та накопичення в важких металів та металоїдів. Як утворюється метилртуть, та чому вирощування рису пов'язане з високим накопиченням Арсену?
10. Які основні екологічні бар'єри регулюють транзит важких металів по трофічних ланцюгах? Яку роль відіграє показник кислотності ґрунту рН та синтез фітохелатинів у рослинах?
11. Порівняйте екотоксикологічні профілі накопичення класичних СО₂ та PFAS в організмі тварин і людини. Чому унікальний хімічний зв'язок С – F робить PFAS вічними, а їхня протеїнофільність змінює класичне уявлення про депонування лише у жирах?
12. Поясніть шлях проникнення нанопластику в рослини крізь мікротріщини. Чому застосування псевдо-біорозкладних (оксорозкладних) пластиків є небезпечною екологічною пасткою?

РОЗДІЛ 3

БІОЛОГІЧНІ ЧИННИКИ ЗНИЖЕННЯ БЕЗПЕКИ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

3.1. Мікотоксини як природні екологічні забруднювачі

Окрім хімічних ксенобіотиків техногенного походження (пестицидів, важких металів, PFAS), значну загрозу екологічній безпеці харчових продуктів становлять токсичні сполуки біологічного походження. Провідне місце серед них за масштабами розповсюдження та ступенем небезпеки посідають мікотоксини.

Хоча мікотоксини є продуктами життєдіяльності живих організмів, а значить природними метаболітами, у харчовій екотоксикології їх класифікують як небезпечні екологічні забруднювачі. Це зумовлено тим, що вони потрапляють у харчову сировину несвідомо для людини внаслідок збою в екологічній рівновазі під час вирощування або зберігання врожаю, є стійкими до стандартних методів кулінарної обробки та чинять потужну ксенобіотичну дію на організм людини.

3.1.1. Загальна характеристика та класифікація мікотоксинів

Мікотоксини - це низькомолекулярні вторинні метаболіти, що продукуються мікроскопічними грибами, наприклад пліснявою і є токсичними для людини та тварин навіть у надзвичайно малих концентраціях, на рівні мкг/кг.

Вторинними ці метаболіти називають тому, що вони не є життєво необхідними для росту самого гриба, а синтезуються як хімічна зброя для конкуренції за субстрат з іншими мікроорганізмами або як засіб захисту від несприятливих умов довкілля.

Плісняві гриби, які є продуцентами мікотоксинів, можна класифікувати за двома основними екологічними групами за часом та умовами інфікування сировини:

1. Польові гриби, що вражають рослини безпосередньо в полі під час вегетації. Найважливішими представниками є гриби роду *Fusarium*. Їхньому розвитку сприяє висока вологість та помірні температури під час цвітіння зернових та формування качанів кукурудзи.
2. Гриби зберігання, які інфікують зібраний врожай під час транспортування та зберігання на елеваторах і складах. Провідну роль відіграють гриби родів *Aspergillus* та *Penicillium*, саме вони продукують афлатоксини та охратоксини. Їх розвиток є наслідком порушення екологічних параметрів мікроклімату у сховищах, таких як підвищена температура, погана вентиляція та, як наслідок, самозігрівання зернової маси.

3.1.2. Спектр забруднення харчової сировини та біоаккумуляція

За даними ФАО (Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН), до 25–50% світового врожаю зернових тією чи іншою мірою забруднено мікотоксинами. Головними субстратами для розвитку плісняви є:

- зернові культури: кукурудза, пшениця, ячмінь, овес, рис;
- горіхи та насіння: арахіс, фісташки, мигдаль, насіння соняшнику;
- сухофрукти: родзинки, інжир, курага;
- інші продукти: кава, спеції, какао-боби, виноградний сік та вино, що містить охратоксин А.

Важливою екологічною особливістю мікотоксинів є їхня здатність до міграції з забруднених кормів в організм сільськогосподарських тварин і накопичення у тваринній продукції. Це явище отримало назву “ефект перенесення”. Наприклад, афлатоксин В1, спожитий коровою з пліснявим силосом, у печінці трансформується і виділяється з молоком у вигляді метаболіту афлатоксину М1. Через це молоко та молочні продукти можуть містити токсини, навіть якщо сама корова виглядає здоровою. Охратоксин А має здатність накопичуватися у м'ясі свиней, у нирках, печінці та крові.

Для агроекологічного моніторингу ключовим є розуміння “екологічного вікна”, тобто вузького діапазону умов, за яких гриб починає активний синтез токсинів. Наявність самої плісняви на продукті ще не означає наявності токсину, проте створення сприятливих умов швидко запускає токсиногенез.

До пріоритетних, найбільш небезпечних мікотоксинів у міжнародній практиці належать афлатоксини та охратоксини.

Афлатоксини

Афлатоксини продукуються переважно *Aspergillus flavus* та *Aspergillus parasiticus*. Найнебезпечнішим субстратом для них є арахіс, кукурудза, бавовняне насіння та сухофрукти.

Гриби є термофілами, їхній інтенсивний ріст та токсиногенез відбувається при температурах 25-35°C та відносній вологості повітря понад 85%. Такі умови є типовими для країн із тропічним та субтропічним кліматом (Африка, Південно-Східна Азія), звідки Україна імпортує горіхи та сухофрукти. Додатковим екологічним фактором є пошкодження зерна комахами, які переносять спори грибів всередину качанів кукурудзи.

Афлатоксин В1 є одним із найпотужніших природних гепатоканцерогенів, тобто вражає печінку. Міжнародне агентство з вивчення раку класифікує природні суміші афлатоксинів як Групу 1 - канцерогенні для людини. Через небезпеку в ЄС та Україні встановлено дуже жорсткі ліміти для Афлатоксин В1 2-8 мкг/кг залежно від продукту.

Охратоксини

Охратоксин А продукується грибами родів *Aspergillus* переважно в тропіках та *Penicillium* в умовах помірного клімату, зокрема в Європі. Головними субстратами є: зернові, кава, какао, сухофрукти та вино.

На відміну від афлатоксинів, охратоксини часто синтезуються в умовах помірного клімату. Ключовим екологічним фактором є підвищена вологість під час збирання врожаю зернових або порушення режиму сушіння кавових зерен. Синтез ОТ А грибом *P. verrucosum* відбувається навіть при температурах 5-10°C, якщо вологість зерна перевищує 18%.

Охратоксин А виявляє виражену нефротоксичність, тобто вражає нирки, також він є накопичувальною отрутою, що зв'язується з білками крові. ОТ А класифіковано як Групу 2В (можливо канцерогенний для людини). Окрім нефропатій, охратоксин чинить потужну імуносупресивну дію, знижуючи опірність організму до інфекційних захворювань.

Встановлені ліміти для зернових становлять 3-5 мкг/кг.

3.1.4. Стратегії екологічного контролю та мінімізації вмісту мікотоксинів

Усунути мікотоксини з харчового продукту, на якому вже з'явилась пліснява практично неможливо, тому що вони стійкі до нагрівання до 200-250°C та стандартних

методів консервації. Тому основою стратегії екологічного контролю є запобігання росту плісняви на всіх етапах харчового ланцюга.

Агротехнічні заходи, які здійснюються до збирання врожаю

Використання сівозмін, що означає не вирощувати кукурудзу по кукурудзі, щоб уникнути накопичення *Fusarium* у ґрунті, виведення сортів рослин, стійких до пліснявіння та комах-шкідників, дотримання оптимальних термінів сівби.

Зберігання та переробка

Це критичний етап, головне завдання якого - швидко знизити рівень активності води субстрату до рівня, непридатного для росту грибів, для зерна це вологість $< 14\%$. Використовується примусове сушіння, активна вентиляція та контроль температури у силосах елеваторів.

Очищення та сортування

Оскільки мікотоксини концентруються переважно в пошкоджених, тріснутих та поїдених комахами зернах, ретельне очищення зернової маси від пошкоджених елементів суттєво знижує загальний рівень забруднення. Сучасні оптичні сортувальники дозволяють видаляти флуоресцентні зерна, інфіковані *Aspergillus flavus*.

Таким чином, екологічний контроль мікотоксинів ґрунтується на концепції комплексного управління мікрокліматом на всіх етапах харчового ланцюга.

3.2. Наслідки масового застосування антибіотиків у тваринництві

Відкриття та впровадження антибіотиків у середині XX століття здійснило революцію не лише в медицині, а й в агропромисловому секторі. Проте інтенсифікація тваринництва, птахівництва та аквакультури призвела до того, що сьогодні понад 70% усіх вироблених у світі антибактеріальних препаратів споживаються саме у ветеринарному секторі.

Масове, часто безконтрольне та безсистемне застосування антибіотиків у сільському господарстві перетворило тваринницькі комплекси на гігантські еволюційні біореактори, де відбувається прискорена селекція та циркуляція стійких до ліків штамів мікроорганізмів, що створює безпрецедентну екологічну загрозу для людства.

3.2.1. Еволюція та масштаби використання антибіотиків у тваринництві

У ветеринарній практиці та промислового вирощуванні тварин антибактеріальні препарати застосовуються за трьома основними стратегіями, які принципово відрізняються дозуванням та екологічними наслідками:

Терапевтичне застосування або лікування, тобто введення терапевтичних доз препаратів хворим тваринам із діагностованою інфекцією. Цей метод є клінічно виправданим і несе найменші екотоксикологічні ризики за умови дотримання правил використання.

Профілактичне застосування, тобто масове оброблення всього стада або пташника, наприклад, додаванням антибіотика у воду чи сухий корм при виявленні ознак хвороби лише у кількох особин. Це вимушений крок у промисловому тваринництві через надвисоку щільність утримання тварин, де спалах інфекції поширюється лавиноподібно.

Субтерапевтичне застосування або стимуляція росту - це систематичне, тривале введення антибіотиків у надмалих або субтерапевтичних дозах разом із кормом здоровим тваринам упродовж усього циклу їхнього вирощування. Малі дози антибіотиків пригнічують

фонову мікрофлору кишківника тварин, знижуючи рівень субклінічних запалень травного тракту та зменшуючи конкуренцію за поживні речовини між бактеріями та організмом хазяїна. Це призводить до прискореного набору маси тіла на 5-15% та зниження витрат корму.

Але саме субтерапевтичне використання є найнебезпечнішим, оскільки постійний контакт бактерій із низькими концентраціями антибіотика не вбиває їх, а запускає інтенсивний відбір мутантних клітин, стійких до діючої речовини.

Усвідомлюючи небезпеку, Європейський Союз повністю заборонив використання будьяких антибіотиків як стимуляторів росту тварин ще з 1 січня 2006 року (Регламент ЄС № 1831/2003). В Україні з 1 березня 2026 року введено в дію нові норми відповідно до нового Закону України «Про ветеринарну медицину та благополуччя тварин» (Закон № 4718-IX та супутні акти № 1206-IX). Було повністю гармонізовано національне законодавство з регламентами ЄС, категорично заборонивши використання протимікробних засобів як стимуляторів росту чи засобів підвищення продуктивності, обмеживши їх профілактичне застосування, а також запровадивши обов'язковий електронний рецептурний продаж і заборону онлайн-торгівлі рецептурними препаратами. Проте у багатьох країнах світу, зокрема в Азії та Америці ця практика все ще залишається легальною.

3.2.2. Транзит та накопичення залишків антибіотиків у м'ясо-молочній продукції

Потрапляння залишків ветеринарних антибактеріальних препаратів у продукти харчування, таакі як м'ясо, молоко, яйця, мед є прямим наслідком порушення ветеринарних регламентів. Після введення в організм тварини антибіотик проходить фази розподілу, метаболізму та виведення. Час, необхідний для зниження концентрації препарату в тканинах тварини до безпечного рівня, встановленого законом, називається *періодом каренції* або *періодом виведення*. Для різних препаратів він коливається від кількох діб до кількох тижнів.

Якщо тварину відправляють на забій або використовують її молоко раніше завершення цього терміну, залишки ксенобіотика у незмінному вигляді або у формі активних метаболітів потрапляють на стіл споживача. Найчастіше в м'ясо-молочній сировині виявляють представників таких хімічних груп: тетрацикліни, бета-лактами, в тому числі пеніциліни, сульфаніламід, макроліди та аміноглікозиди.

Окремі групи антибіотиків мають виражену органотропну токсичність. Наприклад, залишки аміноглікозидів включно зі стрептоміцином мають нефро- та ототоксичну дію а саме вражають нирки та слуховий нерв; тетрацикліни мають високу спорідненість до кальцію, тому накопичуються в кістках та емалі зубів, викликаючи їх деструкцію; левоміцетин, діючою речовиною якого є хлорамфенікол може викликати апластичну анемію навіть у мікродозах, через що його ветеринарне використання суворо заборонене.

Навіть ультраслідові кількості бета-лактамних антибіотиків групи пеніцилінів у молоці можуть спровокувати гострі алергічні реакції, такі як кропив'янка, набряк Квінке або анафілактичний шок у людей з індивідуальною гіперчутливістю.

Регулярне надходження субтерапевтичних доз антибіотиків з їжею пригнічує корисну мікрофлору шлунково-кишкового тракту людини, стимулюючи розвиток опортуністичних патогенів, наприклад, грибів роду *Candida* або токсикогенних бактерій *Clostridioides difficile*.

3.2.3. Екологічні ризики формування антибіотикорезистентності

Найбільш масштабним і незворотним наслідком використання ветеринарних антибіотиків є формування *антибіотикорезистентності (AMR)*, тобто стійкості інфекційних патогенів до дії протимікробних препаратів. Під дією постійного селективного тиску антибіотиків у кишківнику сільськогосподарських тварин формуються стійкі популяції як зоонозних патогенів (*Salmonella*, *Campylobacter*), так і умовно-патогенної фонові мікрофлори (*Escherichia coli*, *Enterococcus faecium*).

Надалі ці стійкі мікроорганізми виходять за межі ферми і потрапляють у людську популяцію кількома основними шляхами.

Продовольчий шлях - споживання недостатньо термічно обробленого м'яса, сирого молока або продуктів, які зазнали перехресного забруднення на кухні, наприклад, через ніж або обробну дошку, якими різали сиру курятину або інші види м'яса.

Контактний шлях - прямий транзит бактерій від тварин до працівників тваринницьких комплексів, які стають носіями резистентних штамів і поширюють їх у суспільстві.

Екологічний шлях - величезні обсяги рідкого гною та стоків тваринницьких ферм містять як залишки неметаболізованих антибіотиків, так і велику кількість стійких до антибіотиків форм бактерій. Ці стоки потрапляють у ґрунти та відкриті водойми, забруднюючи питну воду та овочеві культури, які зрошуються з річок.

3.2.4. Генетичні механізми резистентності

Загроза AMR не обмежується розмноженням безпосередньо відібраних резистентних бактерій. Бактеріальний світ має унікальну здатність ділитися генетичною інформацією не лише “вертикально”, тобто від материнської клітини до дочірньої, а й “горизонтально” - між різними особинами, навіть тими, що належать до абсолютно різних видів і родин. Горизонтальний перенос генів - це процес передачі генетичного матеріалу організму-реципієнту, який не є його нащадком.

Яскравим і небезпечним прикладом порушення екологічної рівноваги через використання антибіотиків у тваринництві є історія з препаратом колістин. *Колістин (поліміксин Е)* - це старий антибіотик, який тривалий час майже не використовувався в медицині через високу токсичність для нирок. Через це він залишався високоефективним проти найстійкіших супербактерій. Проте у ветеринарії багатьох країн, особливо в Китаї, колістин десятиліттями масово застосовували тоннами як дешевий стимулятор росту на свинофермах та птахофабриках.

У 2015 році вчені виявили, що в кишковій паличці *E. coli* у свиней виник ген стійкості до колістину, названий *mcr-1*. Найстрашнішим виявилось те, що цей ген локалізувався на високорухливій плазміді, здатній до кон'югації. За лічені роки плазміда з геном *mcr-1* через харчові та екологічні шляхи поширилася по всій планеті, проникнувши навіть в лікарні. Сьогодні ген *mcr-1* виявляють у збудників смертельно небезпечних госпітальних інфекцій (*Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa*). Людство практично втратило колістин як протимікробний засіб останньої надії в реаніматології виключно через сільськогосподарське марнотратство.

3.2.5. Концепція «Єдиного здоров'я» (One Health) та ветеринарні обмеження

Глобальна екологічна загроза AMR змусила міжнародне співтовариство переглянути підходи до охорони здоров'я. Було сформульовано так звану концепцію «Єдиного здоров'я» (One Health), яка стверджує, що здоров'я людини, здоров'я тварин та стан навколишнього середовища є нерозривно пов'язаними та взаємозалежними системами.

Європейське агентство з лікарських засобів (ЕМА) розробило систему категоризації протимікробних препаратів для ветеринарії, яка офіційно впроваджується в Україні з 2026 року:

Категорія А (Avoid — Уникати): включає препарати, критично важливі для людини, використання яких у тваринництві повністю заборонене, наприклад, карбопенеми, глікопептиди, лінезолід.

Категорія В (Restrict — Обмежувати): препарати останньої надії у медицині, використання яких у тварин є суворо обмеженим, наприклад, цефалоспорины 3-го та 4-го поколінь, фторхінолони та поліміксини, зокрема колістин. Вони не заборонені повністю, але їх призначення можливе виключно після лабораторного підтвердження чутливості та за відсутності альтернатив з інших категорій.

Категорія С (Caution — Застереження): препарати з помірним рівнем екологічного ризику, наприклад, макроліди, аміноглікозиди.

Категорія D (Prudence — обачність): найменш критичні засоби, що мають застосовуватися відповідно до загальних правил обачного використання, наприклад, тетрацикліни, пеніциліни.

Сучасні тваринницькі комплекси переходять від хімічної профілактики до підвищення рівня гігієни, покращення вентиляції, зниження щільності посадки тварин, а також масового використання альтернатив, таких як застосування вакцин, пробіотиків, пребіотиків та фітобіотиків, які є екстрактами лікарських рослин.

Державні органи здійснюють постійний моніторинг залишків антибіотиків у харчових продуктах методом імуноферментного аналізу, а також здійснюють скринінг стійких штамів бактерій у стічних водах ферм для запобігання поширенню резистентних генів у природних екосистемах.

3.3. Бактеріальне забруднення та екологія патогенів

Забезпечення біологічної безпеки продовольчої сировини традиційно розглядають у межах класичної гігієни та санітарії харчових виробництв. Проте сучасна екотоксикологія та екологія мікроорганізмів доводять, що поведінка бактеріальних патогенів у харчовому ланцюзі підпорядковується фундаментальним законам біосферної циркуляції.

Зоонозні та сапрофітні бактерії не просто пасивно забруднюють готовий продукт, вони є активними компонентами агроєкосистем, здатними до тривалого виживання у ґрунті, воді та рослинних тканинах, адаптації до стресових факторів довкілля та інтеграції у трофічні ланцюги людини.

3.3.1. Екологія патогенних мікроорганізмів в агросфері

Для розуміння шляхів міграції бактеріальних забруднювачів важливо аналізувати їх як екологічні елементи біоценозу орних земель та пасовищ. Більшість небезпечних для людини ентеропатогенів належать до двох екологічних груп:

Факультативні паразити тварин - зоонози. Наприклад, *Salmonella enterica*, ентеропатогенні штами *Escherichia coli*. Їхнім первинним природним резервуаром є травний тракт теплокровних тварин, наприклад птиці, свиней, великої рогатої худоби. Потрапляючи у довкілля з екскрементами, вони здатні переходити до сапрофітного способу життя - виживати у вологому ґрунті та водоймах від кількох тижнів до кількох місяців.

Сапрофітні мікроорганізми з патогенними властивостями. Яскравим представником є *Listeria monocytogenes*. Її природним екологічним середовищем є ґрунт, гниюча рослинна маса, силос та поверхневі води. Для лістерії організм людини або тварини є лише випадковим хазяїном, тоді як її еволюційна адаптація спрямована на виживання у відкритому довкіллі.

3.3.2. Сальмонела (*Salmonella enterica*)

Сальмонели — це грамнегативні паличкоподібні факультативно-анаеробні бактерії родини *Enterobacteriaceae*. Найбільше значення для харчової безпеки мають серотипи *Salmonella Enteritidis* та *Salmonella Typhimurium*.

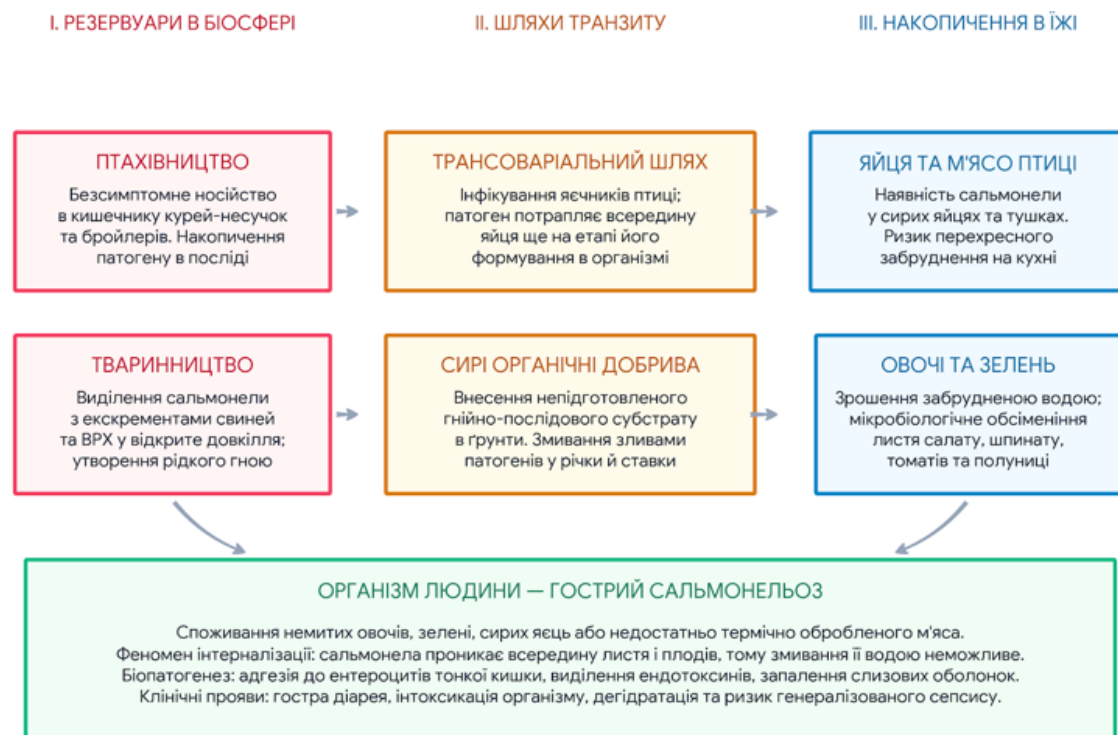


Рис. 6. Резервуари у біосфері та накопичення в їжі сальмонели.

Основним екологічним вектором сальмонели є промислове птахівництво. Особливістю *S. Enteritidis* є здатність до трансоваріальної передачі - бактерія інфікує яєчники курей-несучок, внаслідок чого яйце формується вже зараженим зсередини, ще до утворення шкаралупи. Це робить поверхневу дезінфекцію яєць неефективною.

Сальмонели характеризуються високою персистентністю. У ґрунті, забрудненому послідом, вони зберігають життєздатність до 120-150 діб, у воді відкритих водойм - до 30-90

діб, а у сухих харчових продуктах, наприклад, сухому молоці чи спеціях - понад рік. Оптимальна температура для їхнього росту становить +35-37°C, проте вони припиняють розмноження лише при температурах нижче +5 °C.

3.3.3. Лістерія (*Listeria monocytogenes*)

Лістерія - грампозитивна факультативно-анаеробна паличкоподібна бактерія. Вона є збудником лістеріозу - інфекції з високим рівнем летальності (до 20-30%), що становить особливу загрозу для вагітних жінок, новонароджених та осіб з імуносупресивними станами.

Унікальність лістерії визначається її екстремальною фізіологічною пластичністю: на відміну від більшості інших харчових патогенів, *L. monocytogenes* є психротрофним мікроорганізмом. Вона здатна активно розмножуватися в умовах низьких температур - від +1 до +4°C, а це якраз температурний режим побутових та промислових холодильних камер. Охолодження та зберігання продуктів у холодильнику не консервує лістерію, а лише усуває її конкурентів-мезофілів, створюючи ідеальні умови для її накопичення. Її температурний оптимум лежить у межах +30-37°C, проте фізіологічні адаптації дозволяють підтримувати активний метаболізм майже при температурі замерзання води.

Лістерія витримує високі концентрації кухонної солі (до 10-12% NaCl) та здатна виживати у помірно кислих середовищах pH 4.4, що робить неефективними стандартні методи консервації, такі як засолку або маринування.

Потрапляючи на харчові підприємства, лістерія колонізує технологічне обладнання, стічні канали та конвеєри. Бактерії синтезують позаклітинний полімерний матрикс з екзополісахаридів, формуючи стійкі біоплівки. Усередині біоплівки лістерії стають у 100 - 1000 разів стійкішими до стандартних дезінфектантів, таких як хлор, четвертинні амонійні сполуки тощо, та гарячої води, перетворюючись на персистентні джерела вторинного забруднення готової продукції: сирів, м'ясних нарізок, слабосолоної риби тощо.

3.3.4. Ризики використання неякісних органічних добрив в овочівництві

Органічне землеробство пропагує відмову від мінеральних добрив на користь гною та посліду, проте з погляду екологічної безпеки використання свіжої органіки без належної екологічної підготовки є основним джерелом мікробіологічного забруднення овочів та листової зелені. У свіжому гної великої рогатої худоби та посліді птиці концентрація патогенів (зокрема *Salmonella* та ентерогеморагічної кишкової палички *E. coli*) є критично високою. Єдиним природним та надійним екологічним методом їхнього знешкодження є біотермічне компостування.

У процесі правильного компостування під дією термофільних мікроорганізмів (переважно актиноміцетів та бактерій роду *Bacillus*) відбувається самозігрівання маси з проходженням кількох температурних фаз:

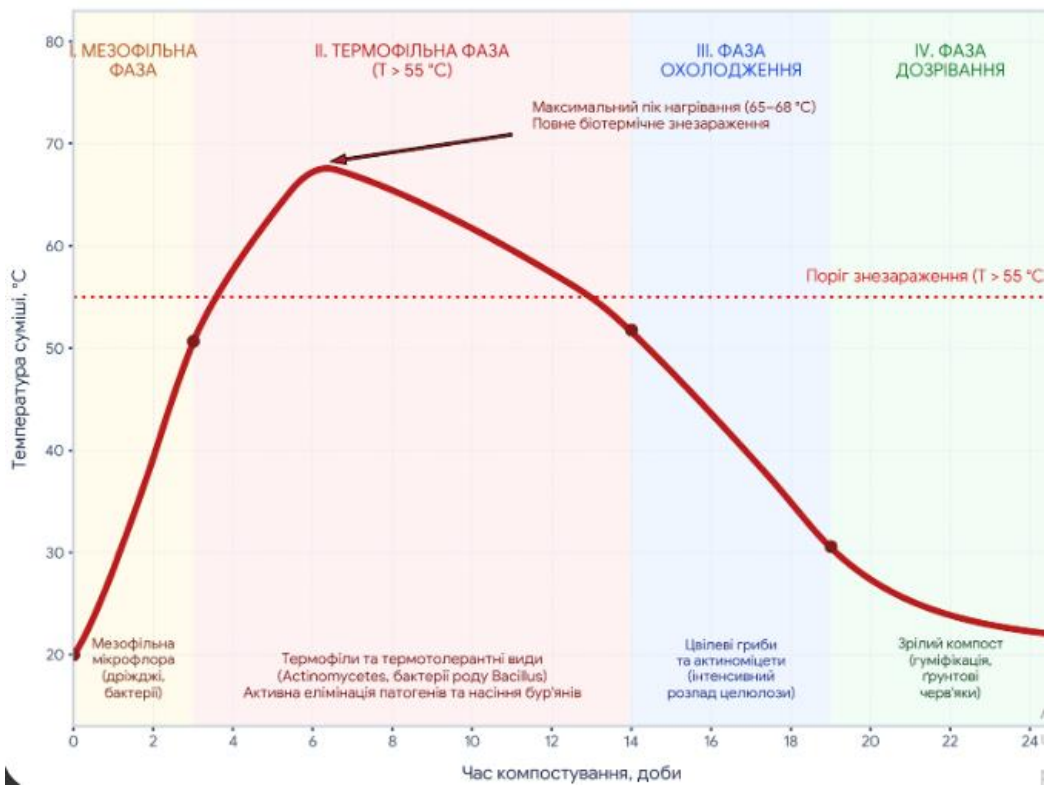


Рис. 7. Температурні зони в процесі компостування гною

Мезофільна фаза - температура підвищується до +40–45°C. Відбувається активний розклад легкодоступних вуглеводів.

Термофільна фаза - температура усередині бурту піднімається до +55- 65°C і утримується на цьому рівні не менше 15 діб (із регулярним перемішуванням для прогріву зовнішніх шарів). У цих екологічних умовах більшість мезофільних патогенних бактерій, вірусів та яєць гельмінтів гинуть через денатурацію білків та руйнування клітинних мембран.

Фаза дозрівання - температура знижується, маса колонізується корисною мезофільною мікрофлорою (зокрема триходермою), утворюється зрілий безпечний компост.

Якщо фермери використовують некомпостований гній або порушують технологію, тобто не забезпечують термофільну фазу по всьому об'єму бурту, патогени виживають. Потрапляючи у ґрунт під час весняного внесення добрив, вони змиваються дощами та поливними водами безпосередньо на рослини.

3.3.5. Шляхи інфікування рослинної продукції

Вирощування листових овочів, наприклад салату, шпинату, руколи, мангольду та ягід, які контактують безпосередньо з ґрунтом і споживаються у свіжому вигляді без термічної обробки, наприклад полуниці, несе найвищі ризики для людини.

Існує два шляхи забруднення рослин патогенами:

Поверхнєве забруднення, коли бактерії з гною чи поливної води осідають на поверхні листя або плодів. Вони утримуються на епікутикулярному воску зовнішнього шару кутикули рослини, завдяки чому не змиваються дощем. Частково це забруднення можна усунути ретельним миттям та дезінфекцією овочів слабкими розчинами органічних кислот.

Серед біофізичних процесів найбільшу підступність має екологічне явище *інтерналізації*, тобто *внутрішнього проникнення*. Наночастинки та бактерії (*Salmonella*, *E. coli*) здатні проникати всередину неушкоджених тканин рослини, наприклад через продихи. При поливі забрудненою водою у спекотний день продихи на листі відкриті для газообміну. Бактерії з краплями води потрапляють у продихову щілину і затікають у субпродихову порожнину та поширюються апопластом. Після закриття продихів бактерії опиняються всередині листа, де вони надійно захищені від сонячного УФ-випромінювання та дії будь-яких поверхневих дезінфектантів. Також аналогічно до нанопластику, бактерії з ґрунтового розчину проникають у мікротріщини коріння в місцях формування бічних коренів. Вони потрапляють у судини ксилеми і розносяться висхідним транспіраційним током по всій рослині, досягаючи їстівного листа та плодів.

Через інтерналізацію навіть сертифіковані “органічні” салати, вирощені на неякісному гної або политі водою з річки, куди стікають води з тваринницьких ферм, стають джерелом важких спалахів токсикоінфекцій у людей, які неможливо попередити простим миттям зелені перед споживанням.

3.3.6. Системи екологічного контролю та мінімізації ризиків

Для гарантування мікробіологічної безпеки овочевої та тваринницької продукції сучасне екологічне законодавство впроваджує превентивні інструменти контролю на всіх етапах харчового ланцюга, а саме:

- регламентується жорстке нормування вмісту індикаторних мікроорганізмів, насамперед кишкової палички *E. coli* у воді для зрошення відповідно до стандартів. Заборонено використовувати для поливу воду з відкритих водойм без попереднього мікробіологічного скринінгу.
- встановлення мінімального часового інтервалу між внесенням гною у ґрунт та збиранням врожаю, наприклад, правило 120 днів для культур, що контактують із землею. Повна заборона використання непідготовленого сирого гною та посліду для підживлення вегетуючих овочевих культур.
- безперервний моніторинг критичних контрольних точок, таких як вологість зерна, температура у сховищах, чистота технологічного обладнання тощо.

3.4. Екотоксикологічні ризики водних екосистем та аквакультури

Світовий океан та внутрішні водойми є кінцевим резервуаром для більшості техногенних хімічних ксенобіотиків, що вимиваються з суходолу. Водночас водне середовище є унікальним інкубатором для виникнення небезпечних природних токсикантів біологічного походження. Розуміння екотоксикології гідробіонтів є критично важливим, оскільки водні харчові ланцюги характеризуються найбільшою кількістю трофічних рівнів, високим вмістом ліпідів у продуцентах та консументах, що сприяє біоаккумуляції ліпофільних отрут та стрімким накопиченням токсинів у кінцевих ланках, де перебуває людина.

3.4.1. Цвітіння водойм та екологія фікотоксинів

Цвітіння водойм - це екологічне явище вибухоподібного розмноження певних видів мікроводоростей, насамперед динофлагелят, діатомей та ціанобактерій у планктоні під дією

евтрофікації, тобто надмірним збагаченням водойми азотом і фосфором та підвищення температури води внаслідок кліматичних змін.

Саме по собі цвітіння викликає дефіцит кисню у воді і задуху риби, але головна екотоксикологічна небезпека полягає в тому, що ці мікрowodорості синтезують вторинні метаболіти - фікотоксини. Ці сполуки не шкодять молюскам-фільтраторам, в тому числі мідіям, устрицям, морським гребінцям, які активно відціджують планктон, але концентруються в їхніх тканинах у смертельних для ссавців та людини дозах.

Пріоритетні фікотоксини

Сакситоксин (Saxitoxin - STX) викликає паралітичне отруєння молюсками.

Сакситоксин є потужним нейротоксином небілкової природи. Він вибірково блокує потенціалзалежні натрієві канали на мембранах нервових та м'язових клітин, що повністю зупиняє проходження нервового імпульсу, викликаючи млявий параліч м'язів. Смерть людини настає від зупинки дихання через параліч діафрагми впродовж 2–12 годин після споживання мідій.

Токсин є термостабільним, не руйнується при варінні, запіканні чи заморожуванні молюсків.

Окадаїнова кислота (Okadaic Acid — OA) викликає діарейне отруєння молюсками.

Окадаїнова кислота є потужним інгібітором внутрішньоклітинних ферментів. Блокування цих ферментів призводить до гіперфосфорилування білків у клітинах епітелію кишківника, це викликає стрімке підвищення проникності клітинних мембран та вихід натрію і води в просвіт кишківника, що провокує важку профузну діарею, зневоднення, нудоту та спазми шлунка. Крім того, окадаїнова кислота є доведеним промотором пухлин тракту при хронічному впливі низьких доз.

Окадаїнова кислота виявляє екстремальну термостабільність. Вона повністю витримує тривалу кулінарну обробку та процеси промислової стерилізації і автоклавування консервованих морепродуктів без зниження своєї біологічної активності.

Домоева кислота (Domoic Acid — DA) викликає амнестичне отруєння молюсками.

Домоева кислота є структурним аналогом глутамату - головного збудливого нейромедіатора мозку ссавців. Вона зв'язується з глутаматними рецепторами у нейронах головного мозку, викликаючи їхнє безперервне збудження та неконтрольований вхід іонів кальцію всередину клітин. Найбільш чутливими до токсину є клітини гіпокампу - відділу мозку, що відповідає за пам'ять та орієнтацію. Симптомами отруєння є незворотна втрата короткочасної пам'яті, дезорієнтація, судоми та кома.

Домоева кислота не руйнується при високотемпературній промисловій переробці. Вона стабільно утримується в тілі молюсків і не видаляється стандартним промисловим промиванням чи термічною пастеризацією.

Сигуатоксин (Ciguatoxin — CTX)

Токсин передається по ланцюгу: траводні риби → хижі риби. Сигуатоксин є екстремально ліпофільним і біомагніфікується у м'язовій тканині та печінці хижаків.

Споживання такої риби викликає важке неврологічне ураження, характерним симптомом якого є температурна реверсія, коли гарячі предмети здаються крижаними, а холодні - пекуче гарячими.

3.4.2. Порівняльна безпека дикої та штучно вирощеної риби (аквакультури)

Зростання глобального попиту на морепродукти на тлі виснаження природних рибних запасів призвело до бурхливого розвитку аквакультури, а саме вирощування риби в штучних умовах: ставках, садках, закритих системах. Сьогодні більше половини рибної продукції на ринку походить з фермерських господарств. Важливо проводити чітку порівняльну оцінку ризиків хімічного та біологічного забруднення дикої риби та риби з аквакультури, оскільки джерела та профілі їхнього ксенобіотичного навантаження є кардинально різними.

Екотоксикологічний профіль дикої риби

Дика риба, особливо морська та океанічна росте у природному середовищі, її раціон складається з планктону та інших гідробіонтів. Головним ризиком в цьому випадку є метилртуть. Через процеси біомагніфікації у довгоживучих хижих риб верхніх трофічних рівнів, таких як тунець, риба-меч, марлін, королівська макрель тощо вміст ртуті перевищує безпечні ліміти у сотні разів. Споживання такої риби вагітними жінками несе пряму загрозу розвитку плода, викликаючи нейротоксичність.

Дика риба з промислових регіонів, наприклад, Балтійського чи Північного морів, накопичує у жировій тканині високі концентрації поліхлорованих біфенілів (ПХБ), діоксинів та залишків хлорорганічних пестицидів (ДДТ). Також виникає доволі високий ризик накопичення фікотоксинів у рибі під час сезонного цвітіння водоростей.

До переваг такої риби відносяться збалансований жирнокислотний профіль із високим вмістом довголанцюгових омега-3 поліненасичених жирних кислот; відсутність залишків ветеринарних препаратів.

Екотоксикологічний профіль штучно вирощеної риби або аквакультури

Фермерська риба, така як лосось, форель, тилапія, дорадо тощо утримується у високій щільності у штучних басейнах або сіткових садках та харчується виключно гранульованим комбікормом. Через високу щільність посадки риби у садках стрімко поширюються бактеріальні інфекції. Для запобігання мору фермери змушені масово застосовувати антибіотики, в тому числі тетрацикліни, сульфаніламід, фторхінолони, залишки яких переходять у готове філе. Це створює аналогічні до тваринництва ризики розвитку антибіотикорезистентності у людей.

Для виробництва рибного корму використовують рибне борошно та риб'ячий жир, виготовлені з дешевої дикої риби. Якщо ця сировина була забруднена ПХБ та діоксинами, ці стійкі сполуки концентрично переходять у фермерського лосося. Концентрація діоксинів у штучно вирощеному лососі іноді перевищує рівень у дикого лосося через жирніший раціон штучного вирощування.

Сучасна аквакультура намагається замінити дороге рибне борошно рослинними білками, наприклад соєю, кукурудзою, ріпаком, як наслідок, у фермерській рибі фіксуються залишки гербіциду гліфосату та інших пестицидів, що використовуються при вирощуванні

ГМО-сої, чого ніколи не буває у дикої океанічної риби. У садках риба часто заковтує мікрочастинки пластикових сіток та обладнання. Крім того, для надання м'ясу лосося привабливого рожевого кольору, який у дикої риби формується природно через поїдання креветок, у корми додають синтетичні каротиноїди - астаксантин та кантаксантин.

До переваг такої риби можна віднести повний контроль якості води у закритих системах УЗВ (ультрафільтрація, відсутність ртуті, оскільки риба не їсть глибоководних хижаків); стабільність поставок, прогнозований розмір та низькі ризики ураження паразитами (через знезараження кормів).

3.4.3. Порівняльна характеристика рибної продукції

У таблиці 3 наведено детальну екологічну та нутритивну порівняльну характеристику дикої риби та продукції штучної аквакультури.

Таблиця 3 - Екологічне порівняння безпеки та якості дикої й фермерської риби

Параметр порівняння	Дика риба (промисловий вилов)	Фермерська риба (аквакультура)
Вміст важких металів	Високий ризик (особливо для великих хижаків: тунець, акула, окунь) через глобальну біомагніфікацію.	Низький/мінімальний ризик завдяки контрольованому складу гранульованих кормів.
Стійкі органічні забруднювачі (ПХБ, діоксини)	Залежить від зони вилову. Високий у закритих промислових морях (Балтика), низький у відкритому океані.	Помірний/підвищений через накопичення ПХБ з неякісного риб'ячого жиру, що входить до складу кормів.
Залишки антибіотиків та ліків	Повністю відсутні (природне середовище).	Помірний/високий ризик у разі недотримання періоду виведення ліків перед забоєм риби.
Пестициди рослинного походження	Повністю відсутні (дика риба не споживає агрокультури).	Можлива наявність (гліфосат, хлорпірифос) через використання сої та ріпаку у комбікормах.
Жирокислотний профіль	Ідеальний баланс із високим вмістом ЕПК та ДГК; низька частка насичених жирів.	Зміщений профіль у бік накопичення прозапальних кислот через рослинну дієту.
Забруднення фікотоксинами	Сезонний ризик під час шкідливого "цвітіння" водоростей у прибережних зонах.	Контрольований ризик у закритих системах, але можливий у відкритих садках.
Зараженість паразитами	Висока природна зараженість (потребує обов'язкового глибокого заморожування перед споживанням).	Мінімальна завдяки гігієнічному контролю штучного середовища та сухій формі кормів.

Не існує однозначно безпечного вибору між дикою та фермерською рибою. Державні системи контролю мають диверсифікувати методи перевірки: дику рибу слід першочергово перевіряти на вміст ртуті та діоксинів, тоді як фермерську продукцію - на залишки антибіотиків, пестицидів та відповідність маркуванню барвників.

На основі аналізу біологічних чинників зниження безпеки харчових продуктів, можна зробити наступні висновки:

1. Мікотоксини, будучи природними вторинними метаболітами пліснявих грибів, класифікуються як небезпечні ксенобіотики через їхню високу стійкість до температурного впливу та здатність до міграції по трофічних ланцюгах від тваринних кормів у тваринницьку продукцію. Для запобігання накопиченню висококанцерогенних афлатоксинів та нефротоксичних охратоксинів критичним є контроль “екологічного вікна” росту грибів, насамперед температури та відносної вологості повітря при зберіганні врожаю на елеваторах.

2. Масове субтерапевтичне застосування протимікробних засобів у тваринництві для стимуляції росту створює постійний селективний тиск на мікробіоту, прискорюючи відбір резистентних штамів. Подальший транзит резистентних бактерій у людську популяцію здійснюється через продовольчий, контактний та екологічний шляхи.

3. Справжнім екологічним викликом є здатність бактеріальних популяцій поширювати гени резистентності шляхом горизонтального переносу генів. Виникнення на свинофермах плазмідного гена *mcr-1* стійкого до колістину, який був препаратом “останньої надії” у реаніматології, підкреслює необхідність суворого ветеринарного регулювання.

4. Вирощування зелені на неякісних органічних добривах створює ризик внутрішнього забруднення, тому що рослини поглинають бактерії не лише поверхнево, а й через процеси інтерналізації, тобто через відкриті пори листя під час поливу забрудненою водою та шлях проникнення крізь мікротріщини у місцях відгалуження бічних корінців. Це унеможливорює очищення продукції поверхневим миттям.

5. Під час шкідливого цвітіння водойм мікроевдорості синтезують термостабільні фікотоксини, які біоакумулюються у водних організмах без шкоди для самого хазяїна. Порівняльний аналіз дикої та фермерської риби виявляє протилежні профілі безпеки: дика риба несе загрозу накопичення глобальних токсикантів, тоді як штучна аквакультура піддається ризикам накопичення залишків антибіотиків, пестицидів із рослинних кормів та мікропластику з басейнів.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Чому мікотоксини, будучи природними продуктами метаболізму грибів, класифікуються в екотоксикології як небезпечні забруднювачі харчових ланцюгів? Поясніть сутність “ефекту перенесення” на прикладі афлатоксину B1.

2. Проаналізуйте параметри “екологічного вікна” росту та токсиногенезу грибів родів *Aspergillus* та *Penicillium*.

3. Охарактеризуйте три основні стратегії використання антибіотиків у тваринництві. Чому саме субтерапевтичне застосування (стимуляція росту) несе максимальну загрозу для еволюційного відбору резистентних бактерій?

4. Що таке “період каренції”? Які наслідки для здоров'я споживача має безпосереднє потрапляння залишків терапевтичних доз антибіотиків (тетрациклінів, аміноглікозидів, бета-лактамів) у м'ясо-молочні продукти?

5. Розкрийте екологічну та генетичну сутність горизонтального переносу генів у мікробіоценозах.

6. Поясніть принципи екотоксикологічної класифікації ветеринарних антибіотиків. Які революційні регуляторні обмеження введено в дію в Україні з 1 березня 2026 року згідно з Законом № 4718-IX?

7. Дайте порівняльну еколого-біологічну характеристику збудників *Salmonella enterica* та *Listeria monocytogenes*. Які унікальні фізіологічні властивості психротрофа дозволяють лістерії персистувати на харчових підприємствах?
8. Опишіть динаміку та біохімічну сутність термофільної фази компостування гною. Чому порушення цієї температурної та часової експозиції створює прямі ризики для безпеки вирощування овочевої продукції?
9. Розкрийте біофізичні механізми бактеріальної інтерналізації в рослини крізь продиhi листя та за допомогою шляху крізь мікротріщини у корінні. Чому екологічні стандарти вимагають жорсткого мікробіологічного моніторингу поливної води?
10. Які екологічні чинники викликають шкідливе “цвітіння” водойм (HABs)?
11. Проведіть комплексний порівняльний екотоксикологічний аналіз дикої морської риби та штучно вирощеної аквакультури. Сформулюйте основні компроміси вибору рибної продукції для споживача та завдання для державного моніторингу.

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ЗНИЖЕННЯ ЕКОТОКСИКОЛОГІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

4.1. Побутові методи очищення харчових продуктів

Свіжа листова зелень, овочі, фрукти та ягоди становлять основу повноцінного та збалансованого раціону людини, разом з тим в умовах інтенсивного агровиробництва саме ці категорії харчової сировини найчастіше стають джерелами токсикологічних ризиків. Найбільшу загрозу зазвичай становить рання продукція закритих ґрунтів, у якій через фізіологічні особливості вирощування вміст нітратів та залишків пестицидів часто перевищує встановлені санітарно-гігієнічні нормативи.

Оскільки повністю виключити надходження забруднених продуктів на споживчий ринок неможливо, важливо орієнтуватись у прикладних методах кулінарної детоксикації харчової сировини, які дозволяють знизити хімічне навантаження на організм людини на 30-90%.

4.1.1. Хімічна природа нітратів та біохімічні механізми їх токсичності

Нітрати - це солі азотної кислоти HNO_3 , які є природними та обов'язковими компонентами ґрунтового розчину. Оскільки Нітроген є лімітуючим елементом росту рослин, будь-яка рослинна культура поглинає його у формі нітрат-іона NO_3^- для подальшого синтезу амінокислот та білків. Через це в природі не існує рослинної їжі, яка б зовсім не містила нітратів.

Широко поширена серед споживачів думка, що сертифіковане органічне землеробство повністю гарантує відсутність нітратів, є науковою помилкою. Натуральні органічні добрива, такі як компост, перегній, а особливо птишиний послід містять велику кількість азотних сполук, які ґрунтові мікроорганізми в процесі нітрифікації швидко перетворюють на рухомі нітрати. З екологічної точки зору, птишиний, особливо курячий послід є найбільш концентрованим азотним добривом, тому при неконтрольованому його внесенні в ґрунт рослини накопичують нітратів навіть більше, ніж при використанні синтетичної аміачної селітри NH_4NO_3 .

Самі по собі нітрати мають низьку гостру токсичність. Проте при потраплянні в травний тракт людини під дією ферментів кишкової мікрофлори вони відновлюються до значно небезпечніших нітритів NO_2^- .

Нітрити виявляють подвійну токсичну дію. Нітрит-іони активно окиснюють двовалентне залізо гемоглобіну у тривалентне, перетворюючи його на метгемоглобін. Ця сполука втрачає здатність зв'язувати та транспортувати кисень, що призводить до розвитку тканинної гіпоксії, тобто кисневого голодування. У кислому середовищі шлунка нітрити вступають в реакцію з вторинними амінами їжі, утворюючи нітрозаміни, високоактивні канцерогени, які підвищують ризик виникнення онкологічних захворювань шлунково-кишкового тракту.



Рис. 8. Метаболізм нітратів в організмі людини

Нітрит натрію NaNO_2 , що відомий як харчова добавка E250 масово використовується у м'ясопереробній промисловості як фіксатор кольору ковбасних виробів та консервант проти ботулізму. Через високий ризик термічного утворення нітрозамінів медики суворо не рекомендують піддавати обсмаженню чи тривалому запіканню готові ковбаси та копченості.

4.1.2. Нормативне регулювання та закономірності накопичення нітратів

Концентрація нітратів у готовому врожаї залежить від ботанічного виду рослини, умов вирощування, наприклад закритий чи відкритий ґрунт та сезону збору. Світловий режим є ключовим лімітуючим чинником: при дефіциті сонячного світла, у зимово-весняний період або в теплицях активність ферменту нітратредуктази знижується, і рослина не встигає переробляти поглинутий азот у білки, накопичуючи його у вакуолях у вільному стані.

Відповідно до європейських регламентів (зокрема, Regulation (EU) 2023/915) та національних санітарних норм України, встановлено жорсткі гранично допустимі концентрації (ГДК) нітратів для різних культур.

Таблиця 4 - ГДК нітратів в овочевих культурах та зелені

Культура (ботанічна назва)	Умови вирощування / Сезон збору	ГДК, мг/кг	Науково-методичні примітки та біохімічні особливості
ЛИСТОВІ ОВОЧІ ТА ЗЕЛЕНЬ			
Рукола (<i>Eruca sativa</i>)	Осінньо-зимовий (01.10 – 31.03) Весняно-літній (01.04 – 30.09)	до 7000 до 6000	Природний рекордсмен за кумуляцією азотистих сполук. Потребує суворого токсикологічного контролю; теза про виняткову здатність «очищувати печінку» є дієтологічним міфом.
Салат-латук (<i>Lactuca sativa</i>)	Закритий ґрунт (зима) Закритий ґрунт (літо)	до 5000 до 4000	Показує чітку фізіологічну залежність від інсоляції. У теплицях норми вищі через брак світла, що уповільнює роботу ферменту нітратредуктази.

	Відкритий ґрунт (зима/ранній) Відкритий ґрунт (літо)	до 4000 до 3000	
Салат «Айсберг»	Закритий ґрунт Відкритий ґрунт	до 2500 до 2000	На відміну від класичних салатів, особливості будови качана обмежують надмірне накопичення нітратів.
Шпинат свіжий	Норми ЄС Національні стандарти	до 3500 до 2500	Схильний до високої акумуляції азоту. Регулюється окремими міжнародними та внутрішніми директивами.
Інша зелень (кріп, петрушка, кінза)	Закритий ґрунт Відкритий ґрунт	до 3000 до 2000	Велика частина солей азоту концентрується безпосередньо у провідних тканинах — стеблах та черешках.
КОРЕНЕПЛОДИ ТА ІНШІ ОВОЧІ			
Столовий буряк	Загальний норматив	до 1400	Найбільш схильний до накопичення нітратів серед коренеплодів через високу ємність вакуолей паренхіми клітин.
Капуста білоголова	Рання (теплична) Пізня (відкритий ґрунт)	до 900 до 500	Форсоване тепличне вирощування зумовлює високі ліміти для ранніх сортів. У пізній капусті нітрати зосереджені переважно в качані (кочерзі).
Морква	Рання (врожай до 1 вересня) Пізня	до 400 до 250	Максимальна концентрація сполук спостерігається у внутрішній серцевині коренеплоду.
Солодкий перець	Закритий ґрунт Відкритий ґрунт	до 400 до 200	Генеративні органи (плоди) рослин фізіологічно накопичують набагато менше нітратів, ніж вегетативні.
Огірки	Закритий ґрунт Відкритий ґрунт	до 300 до 150	Розподіл речовин нерівномірний: найбільша кількість фіксується у шкірці та біля плодоніжки.
Томати	Загальний норматив	до 150	Характеризуються генетично низькою здатністю до кумуляції нітратних сполук.
Цибуля ріпчаста	Підземна цибулина Зелене перо (закритий ґрунт) Зелене перо (відкритий ґрунт)	до 80 до 800 до 600	Цибулина майже не накопичує азот, тоді як зелена вегетативна маса (перо) утримує його у 7–10 разів інтенсивніше.

4.1.3. Топографія розподілу нітратів в органах рослин та механічні методи очищення

Розподіл нітратів всередині однієї рослини є суттєво нерівномірним і визначається напрямком руху висхідного току води по судинах ксилеми. Найвища концентрація солей завжди зосереджується поблизу кореневої системи, у провідних черешках та жилках листя.

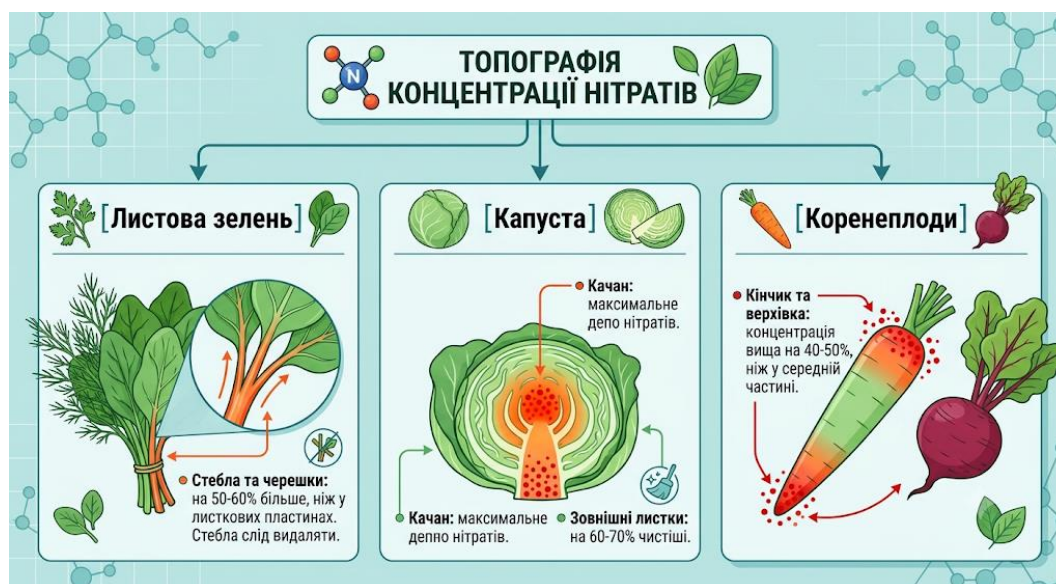


Рис. 9. Розподіл нітратів в органах рослин

Таблиця 5 - Кулінарні способи зниження вмісту нітратів

Рослина	Локалізація максимального вмісту нітратів	Кількісна характеристика розподілу	Практичні рекомендації щодо кулінарної обробки
1. Листова зелень (петрушка, кріп, селера)	Жорсткі черешки та стебла рослин.	У нижніх листових пластинах вміст нітратів на 50–60% нижчий, ніж у провідних пучках стебел.	Перед вживанням чи приготуванням страв стебла необхідно повністю зрізати та видаляти.
2. Капуста білоголова	Качан (основний провідний вузол) та прилеглі до нього зони.	Качан депонує максимальну кількість солей. Видалення качана та верхніх листків знижує рівень нітратів у страві на 60–70%.	Обов'язково вирізати качан, а також видаляти 2–3 зовнішні покривні листки.
3. Огірки, баклажани, кабачки та баштанні (кавуни, дині)	Шкірка плоду та тканини, безпосередньо прилеглі до плодоніжки.	У цих зонах фіксується найвища концентрація солей азотної кислоти та поверхневих пестицидів.	Зрізати шкірку завтовшки близько 1 мм та видаляти хвостики (частину плоду біля плодоніжки).
4. Ступінь зрілості плодів (наприкладі томатів тощо)	Усі тканини незрілого плоду.	Недозрілі овочі містять у 2–3 рази більше нітратів, ніж повністю стиглі плоди.	Вживати в їжу лише повністю стиглу продукцію. Уникати споживання незрілих плодів (наприклад, зелених томатів).

4.1.4. Фізико-хімічні методи детоксикації в домашніх умовах

Нітрати є високополярними сполуками, які виявляють дуже гарну розчинність у воді. Ця фізико-хімічна властивість лежить у основі більшості домашніх методів очищення сировини.

1. Вимочування

Вимочування овочів та зелені у холодній воді протягом щонайменше 1 години дозволяє вимити значну частину вільних нітрат-іонів. Об'єм води має у кілька разів перевищувати об'єм продукції, щоб забезпечити градієнт концентрацій для дифузії солей з клітинного соку назовні. Використання 1%-го розчину аскорбінової кислоти (вітаміну С) для вимочування знижує вміст нітратів на 50%. Аскорбінова кислота виступає сильним відновником: вона блокує перетворення нітратів на нітроти безпосередньо у розчині та перешкоджає подальшому утворенню нітрозамінів.

2. Процес ферментації, квашення та соління

Ферментація є ефективним біологічним методом детоксикації овочевої продукції, такої як капуста, огірки, томати тощо.

У перші дні бродіння під дією молочнокислих бактерій рівень нітратів може тимчасово коливатись через вимивання їх у розсіл. На 4-5-й день починається стрімке руйнування нітратних сполук ферментними системами мікроорганізмів. Споживати квашені овочі рекомендується прилізно на 10-й день від початку бродіння, коли концентрація вільних нітратів падає до мінімального, повністю безпечного рівня.

3. Використання органічних кислот

Природні органічні кислоти, такі як лимонна та гранатова є потужними природними антиоксидантами. Додавання свіжого лимонного чи гранатового соку як заправки до свіжих салатів виконує важливу захисну роль: низький показник рН та високий вміст антиоксидантів гальмують хімічні реакції відновлення нітратів до токсичних нітритів у шлунку та повністю блокують процеси нітразування.

Таблиця 6 - Ефективність побутових методів детоксикації харчових продуктів

Категорія продукції	Головний забруднювач	Оптимальний побутовий протокол обробки	Середній відсоток зниження (%)
Листова зелень (петрушка, кріп, шпинат)	Нітрати, контактні пестициди	Видалення черешків; вимочування у 10%-му розчині NaCl або содовому розчині протягом 20 хв.	45-60 %
Коренеплоди (картопля, буряк, морква)	Нітрати, важкі метали	Механічне зрізання шкірки та кінчиків; варіння у воді протягом 20 хв зі зливанням першого відвару.	60-80 %
Плодові овочі (огірки, кабачки, томати)	Контактні пестициди, нітрати	Зрізання шкірки та зони плодоніжки; вимочування у 1%-му розчині NaHCO ₃ (соди) 15 хв.	75-90 %
Крупи та зернові (рис, гречка)	Системні пестициди, миш'як	Багаторазове промивання холодною водою; варіння у великому об'ємі води (співвідношення 1:6) зі зливанням залишку води.	40-50 %
М'ясо-молочна продукція	Радіонукліди, антибіотики	Зрізання жиру; варіння м'яса протягом 15 хв із повним зливанням першого бульйону.	50-70%

4.2. Природні механізми захисту організму від ксенобіотиків.

Упродовж мільйонів років еволюції живі організми постійно контактували з різноманітними природними токсинами рослин, грибів, продуктами горіння лісів тощо. Як наслідок, в організмі людини сформувалась потужна багатокomпонентна система внутрішнього захисту та виведення чужорідних речовин, але сучасний техногенний пресинг створює хімічне навантаження, яке часто перевищує фізіологічні можливості організму. Розуміння того, як працюють наші природні захисні бар'єри та як звичайні рослинні компоненти їжі можуть стимулювати виведення ксенобіотиків, є основою для розробки дієтологічних стратегій екологічної безпеки людини.

4.2.1. Трифазна ендогенна система детоксикації ксенобіотиків

Знешкодження чужорідних сполук у тілі людини (переважно у клітинах печінки, а також у нирках та кишківнику) відбувається у три послідовні етапи.

Головна мета цієї системи - перетворити ліпофільні токсиканти, які легко накопичуються в жирових тканинах і не можуть бути виведені нирками, на гідрофільні, тобто водорозчинні сполуки, які організм може легко вивести з сечею чи калом.



Рис. 10. Ендогенна система детоксикації ксенобіотиків

Фаза I - Модифікація

Ксенобіотик піддається первинній хімічній реакції, найчастіше окисненню. Мета цього етапу - розкрити молекулу токсиканту, ввівши в неї активну полярну групу (наприклад, OH або NH₂). Іноді продукти першої фази, тобто проміжні речовини виявляються більш активними та токсичними за вихідну речовину. Якщо наступні системи захисту працюють повільно, ці проміжні сполуки можуть пошкоджувати клітину.

Фаза II - Зв'язування

До хімічно активного ксенобіотика, підготовленого на першій фазі, приєднується спеціальна полярна молекула організму, наприклад, глутатіон або глюкуронова кислота. Це

робить комплексну сполуку повністю водорозчинною і безпечною. Глутатіон є головним внутрішнім захисником клітини від важких металів та продуктів окиснення пестицидів.

Фаза III - Виведення

Спеціальні транспортні білки клітинних мембран активно викачують утворені безпечні водорозчинні сполуки з клітини у жовчні капіляри, для виведення з калом через кишечник або в системний кровотік, для фільтрації нирками та виведення з сечею.

4.2.2. Харчові волокна та пектини як природні ентеросорбенти

Значна частина нейтралізованих у печінці ксенобіотиків разом із жовчю виділяється у кишечник. Тут виникає серйозна загроза - повторне всмоктування токсинів або ентерогепатична циркуляція. Жиророзчинні сполуки, зокрема діоксини, пестициди та мікропластик можуть знову всмоктуватися стінками кишечника у кров, створюючи замкнене коло хронічного отруєння.

Головним інструментом переривання цього процесу та прискореного виведення токсикантів є харчові волокна, такі як клітковина, геміцелюлоза, лігнін, пектини - складні рослинні вуглеводи, які не перетравлюються ферментами людини.



Рис. 11. Вплив харчових волокон як ентеросорбентів.

Механізми дії харчових волокон:

Фізико-хімічне зв'язування або адсорбції). Волокна мають пористу структуру і діють у кишечнику як губка, вони адсорбують на своїй поверхні ліпофільні токсиканти, що виділилися з жовчю, а також пестициди та мікропластик, які потрапили з їжею, перешкоджаючи їхньому контакту зі слизовою оболонкою.

Іонний обмін або хелатування. Пектини є розчинними харчовими волокнами, що містяться у плодах рослин. Вільні карбоксильні групи пектинових ланцюгів мають унікальну здатність зв'язувати двовалентні катіони важких металів, таких як свинець, кадмій, кобальт,

ртуть тощо. При цьому утворюються міцні, нерозчинні комплекси, пектати металів, які не здатні всмоктуватися в кров і повністю виводяться з організму.

Прискорення перистальтики. Харчові волокна механічно стимулюють стінки кишечника, прискорюючи просування харчової маси. Це критично знижує час, упродовж якого токсикант може дифундувати крізь стінки травного тракту у кровотік.

4.2.3. Природні антиоксиданти та їх участь у захисті клітин від окиснювального стресу

Більшість ксенобіотиків, таких як важкі метали, пестициди, нанопластик викликають у клітинах патологічну реакцію - окиснювальний або оксидативний стрес, провокуючи надмірне утворення вільних радикалів.

Вільні радикали мають неспарений електрон, тому вони є хімічно надзвичайно агресивними: вони атакують ліпіди клітинних мембран, руйнують важливі білки та викликають пошкодження ДНК.

Природні антиоксиданти, які людина отримує з їжею, виступають як донори електронів. Вони добровільно віддають свій електрон вільному радикалу, нейтралізуючи його та перериваючи руйнівну ланцюгову реакцію.

Найважливіші харчові антиоксиданти

Вітамін С (аскорбінова кислота). Головний водорозчинний антиоксидант, працює у внутрішньому середовищі клітин та міжклітинній рідині, миттєво нейтралізуючи вільні радикали та відновлюючи пошкоджений вітамін Е.

Вітамін Е. Головний жиророзчинний антиоксидант, локалізується безпосередньо всередині ліпідного шару клітинних мембран, захищаючи клітини печінки та червоні кров'яні тільця від руйнування пестицидами.

Поліфеноли (флавоноїди, ресвератрол, катехіни) - рослинні сполуки, якими багаті зелений чай, ягоди та фрукти. Вони мають подвійну дію: безпосередньо нейтралізують вільні радикали та зв'язують іони важких металів, перешкоджаючи утворенню найбільш агресивних форм кисню. Крім того, поліфеноли активують внутрішній сигнальний фактор захисту клітини, який запускає посилений синтез власних ферментів детоксикації та глутатіону.

У таблиці 6 наведено узагальнену оцінку ролі компонентів раціону у підтримці природних систем детоксикації людини.

Таблиця 7 - Вплив компонентів їжі на виведення ксенобіотиків

Компонент їжі	Основний механізм захисту	Головні джерела в раціоні	Цільові ксенобіотики
Пектини	Зв'язування іонів металів; утворення нерозчинних пектатів.	Яблука, буряк, цитрусові, чорна смородина, сливи.	Важкі метали, радіонукліди
Нерозчинна клітковина	Фізична адсорбція отрут; прискорення виведення з кишечника.	Висівки, цільнозернові злаки, капуста, бобові.	Стійкі органічні забруднювачі (діоксини, PFAS).

Вітамін С	Нейтралізація вільних радикалів; відновлення вітаміну Е.	Шипшина, ківі, цитрусові, брокколі, зелень.	Продукти окиснення пестицидів, важкі метали.
Вітамін Е	Захист ліпідів мембран від руйнування вільними радикалами.	Нерафіновані олії, горіхи, насіння соняшнику.	Ліпофільні пестициди, органічні розчинники.
Поліфеноли	Зв'язування металів; активація внутрішніх ферментів захисту.	Зелений чай, темний шоколад, цибуля, ягоди.	Загальне хімічне навантаження, мутагени, пестициди.

4.3. Концепція локальних та сезонних продуктів

Глобалізація світового продовольчого ринку призвела до унікального явища: сучасний споживач у супермаркеті практично втратив відчуття сезонності. Свіжі томати, полуниця, виноград чи яблука доступні на прилавках протягом усього року, незалежно від природно-кліматичних умов конкретного регіону. Проте за це технологічне досягнення людина і довкілля розплачуються високою екологічною та токсикологічною ціною.

4.3.1. Екологічний індикатор Food Miles (харчові милі) та вуглецевий слід

Одним із головних екологічних викликів системи харчування є транспортування сировини. Для оцінки цього впливу в екологічній політиці використовують концепцію Food Miles (харчових миль), тобто сумарної відстані, яку долає продукт харчування від місця його вирощування до столу кінцевого споживача.



Рис. 12. Вплив глобалізованого продовольчого ланцюга на довкілля та здоров'я людини

Екологічні наслідки довготривалого транспортування:

1. *Емісія парникових газів від різних видів транспорту.* Транспортування продовольства здійснюється переважно авіаційним, морським, залізничним та автомобільним транспортом. Спалювання викопного палива призводить до масштабних викидів вуглекислого газу, оксидів азоту та ультрадисперсних частинок сажі. За оцінками екологів, на транспортний сектор припадає до 20% від загального обсягу викидів парникових газів у продовольчій системі.

2. *Енерговитрати на рефрижерацію.* Продукти, що швидко псуються, такі як ягоди, зелень, екзотичні фрукти тощо вимагають безперервного підтримання низькотемпературного режиму на всьому шляху транзиту, так званого холодового ланцюга. Робота компресорів рефрижераторів на суднах та вантажівках потребує додаткових енерговитрат і супроводжується витоками фреонів, які руйнують озоновий шар та посилюють парниковий ефект.

3. *Пакування.* Для захисту ніжних плодів від механічних пошкоджень під час тривалого транспортування виробники змушені використовувати велику кількість індивідуального пластикового пакування - блістерів, плівок, сіток тощо. Це суттєво збільшує обсяг твердих побутових полімерних відходів та прискорює накопичення мікропластику в довкіллі.

Мінімізація продовольчих миль шляхом купівлі продукції у місцевих фермерів у радіусі 100-150 км від місця проживання дозволяє радикально скоротити транспортні викиди та відмовитись від надлишкової пластикової упаковки.

4.3.2. Хімічні наслідки транспортування

Найбільша токсикологічна небезпека імпортованої позасезонної продукції полягає в тому, що для її збереження впродовж тижнів чи місяців транспортування виробники змушені застосовувати агресивну хімічну обробку після збору врожаю. Рослини у зрілому стані природно дихають та виділяють вологу, що робить їх легкою мішенню для гнильних бактерій та плісняви.

Для уповільнення цих процесів використовують три основні групи хімічних ксенобіотиків.

Післязбиральні фунгіциди та антисептики

Перед пакуванням плоди занурюють у ванни або обприскують розчинами хімічних препаратів, які запобігають розвитку цвілі. Найбільш вживаним є *імазаліл*, потужний системний фунгіцид. Його масово використовують для обробки цитрусових - лимонів, апельсинів, мандаринів та бананів. Імазаліл є стійким, погано змивається водою і класифікується як потенційний канцероген та ендокринний деструктор.

Також дуже часто використовують *тіабендазол* для запобігання гниття яблук, груш та бананів. Він діє як системний токсикант, що у великих дозах може негативно впливати на роботу щитоподібної залози та нирок.

Інгібітори дозрівання

Щоб плоди не перестигли під час транспортування, їх тримають у камерах із регульованим газовим середовищем, де рівень кисню знижують, а концентрацію вуглекислого газу підвищують.

Додатково застосовують специфічні блокатори такі як *1-метилциклопропен або 1-МЦП* - газоподібна речовина, яка вибірково зв'язується з білковими рецепторами етилену в рослинних клітинах. Оскільки етилен є природним гормоном старіння та дозрівання плоду, блокування його рецепторів повністю зупиняє процеси дозрівання та розпаду хлорофілу. Яблука чи груші, оброблені 1-МЦП, можуть зберігатися у сховищах до 1 року без видимих ознак старіння, проте їхні внутрішні нутритивні якості при цьому поступово деградують.

Дифеніламін використовується для запобігання потемніння шкірки яблук під час тривалого зберігання. В країнах ЄС використання дифеніламіну заборонено через ризик утворення канцерогенних нітрозамінів на поверхні плодів, проте імпортована продукція з інших регіонів світу все ще може містити його залишки.

Покривні воскові суміші

Для запобігання втраті вологи, плоди покривають тонкими захисними сумішами на основі натуральних або синтетичних восків, наприклад карнаубський віск, з додаванням парафінів. Самі по собі ці воски малотоксичні, проте вони консервують та утримують на поверхні шкірки раніше нанесені фунгіциди, такі як імазаліл та тіабендазол, унеможливаючи їх видалення шляхом звичайного миття у домашніх умовах.

4.3.3. Біохімічні переваги сезонності

Концепція сезонності тісно пов'язана з біологічною цінністю їжі. Плоди, призначені для локального ринку, збирають у стані оптимальної фізіологічної зрілості, коли рослина встигла накопичити максимальну кількість цукрів, вітамінів та природних антиоксидантів безпосередньо від материнського куща чи дерева під впливом природної інсоляції.

Натомість імпортовану продукцію зрізають у стані глибокої недозрілості, оскільки тверді зелені плоди легше транспортувати без ризику механічного пошкодження.

Після прибуття на місце призначення, наприклад, у бананово-дозрівальні камери в Україні недозрілі зелені плоди обробляють сумішшю штучного газу етилену C_2H_4 . Етилен запускає каскад розпаду хлорофілу та гідролізу крохмалю до простих цукрів, коли плоди швидко жовтіють чи червоніють. Хоча зовні плід набуває товарного вигляду і стає солодким, він не містить тієї кількості біоактивних речовин, яку б він накопичив при природному дозріванні на сонці.

Навіть в ідеальних умовах охолодження, з кожним днем транспортування та зберігання вміст лабільних мікронутрієнтів у плодах стрімко падає. Наприклад, свіжозібраний шпинат або зелений горошок втрачають до 50% свого початкового вмісту вітаміну С вже за 3–5 днів транспортування за кімнатної температури та до 20-30 % при холодному зберіганні. Споживаючи імпортовану свіжу зелень взимку, людина часто отримує лише клітковину та воду, без очікуваного вітамінного профіциту.

У таблиці 7.3 наведено детальну екологічну та токсикологічну порівняльну характеристику імпортованих позасезонних та локальних сезонних продуктів харчування.

Таблиця 8 - Порівняльний профіль імпортованої та локальної сезонної продукції

Параметр порівняння	Імпортована позасезонна продукція	Локальна сезонна продукція
Продовольчий слід (Food Miles)	Надзвичайно високий 3000-15000 км); значні викиди CO ₂ та використання рефрижераторів.	Мінімальний 20-150 км; низький рівень транспортного та вуглецевого навантаження.
Обробка фунгіцидами (після збору)	Обов'язкова та інтенсивна (імазаліл, тіабендазол) для запобігання псуванню у дорозі.	Відсутня або мінімальна; продукція постачається споживачу одразу після збору.
Штучні покриття (воски, парафіни)	Масове використання для запобігання дегідратації плодів; консервує пестициди на поверхні.	Не використовуються; шкірка плодів вільна від штучних плівок.
Технологія дозрівання	Штучна газація етиленом у спеціальних камерах після транспортування.	Природне фізіологічне дозрівання на рослині під дією сонячного випромінювання.
Нутритивна цінність (вітамін С)	Знижена/деградована через тривале зберігання та передчасне збирання плодів.	Максимальна; плоди містять природно високі рівні вітамінів, антиоксидантів та ферментів.
Вимоги до пакування	Надлишкові пластикові блістери, контейнери та плівки для уникнення механічного бою.	Мінімальне пакування або використання екологічно безпечного паперового й оборотного посуду.

Отже, локальні та сезонні продукти є золотим стандартом екологічної безпеки харчування. Вони дозволяють суттєво знизити транспортний слід та повністю відмовитись від небезпечної післязбиральної хімічної обробки плодів консервантами та восковими сумішами. Екологічний моніторинг повинен стимулювати розвиток коротких продовольчих ланцюгів, які з'єднують місцевого фермера безпосередньо з локальним споживачем, забезпечуючи максимальну свіжість, нутритивну повноцінність та хімічну безпеку їжі.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Охарактеризуйте фізіологічний зв'язок між рівнем інсоляції рослини та накопиченням вільних нітрат-іонів у її вакуолях. Яку роль у цьому процесі відіграє фермент нітратредуктаза?
2. Опишіть біохімічний механізм подвійної токсичної дії нітритів в організмі людини. Яким чином харчова добавка NaNO₂ (E250) може призвести до тканинної гіпоксії?
3. Поясніть закономірності топографічного розподілу нітратів в органах рослин (на прикладі листової зелені, капусти та огірків). Як ці закономірності використовуються при механічному очищенні сировини?
4. Розкрийте фізико-хімічне обґрунтування дифузії нітратів під час вимочування. Чому додавання 1%-го розчину аскорбінової кислоти або свіжого лимонного соку суттєво знижує токсикологічний ризик нітратних сполук?

5. Опишіть кінетику руйнування нітратів під час молочнокислого бродіння (квашення овочів). Чому не рекомендується вживати ферментовану продукцію у перші 4-5 діб від початку процесу?

6. Детально опишіть три послідовні фази функціонування ендогенної системи детоксикації ксенобіотиків людини. Яку роль на Фазі I відіграють ферменти цитохроми і чому проміжні продукти модифікації іноді є небезпечнішими за вихідні речовини?

7. Що таке ентерогепатична циркуляція ліпофільних ксенобіотиків, і які екологічні ризики для здоров'я людини вона створює? Яким чином харчові волокна здатні перервати це замкнене коло?

8. Поясніть хімічний механізм сорбції та іонного обміну (хелатування) важких металів у кишечнику за допомогою пектинів. Які комплекси при цьому утворюються, і який їхній подальший шлях в організмі?

9. Розкрийте поняття окиснювального стресу, що ініціюється ксенобіотиками. Поясніть біохімічний синергізм дії вітамінів С та Е, а також роль поліфенолів у активації захисного внутрішньоклітинного сигнального шляху.

10. Проаналізуйте екологічні та хімічні наслідки довготривалого транспортування імпортованих плодів (індикатор «Food Miles»). Які ксенобіотики (фунгіциди, інгібітори дихання, покривні суміші) використовуються для післязбиральної обробки плодів, і чому споживання локальних сезонних продуктів є екологічно безпечнішим?

ВИСНОВКИ

Якість та безпека продовольчого кошика безпосередньо закладаються на початкових етапах трофічних ланцюгів агросфери. Стан ґрунтового мікробіому, рівень антропогенного навантаження на орні землі, глобальні кліматичні трансформації та обрана модель господарювання є тими первинними екологічними чинниками, які формують як нутритивну щільність рослинної сировини, так і ризики накопичення небезпечних сполук. Спроби форсувати врожайність за допомогою високих доз синтетичних добрив призводять до якісного знецінення продуктів і поширення прихованого нутритивного дефіциту серед населення, тоді як кліматичний стрес та температурні аномалії запускають процеси надмірного накопичення нітратів та інтенсивну міграцію високотоксичних мікотоксинів у нові географічні широти.

Забезпечення захисту споживача від сучасного хімічного тиску потребує комплексного поєднання індивідуальних і системних стратегій. Розуміння фізико-хімічних закономірностей поведінки ксенобіотиків дозволяє ефективно використовувати кулінарні методи очищення сировини, підтримувати природну багатокomпонентну систему детоксикації організму рослинними сорбентами й антиоксидантами, а також мінімізувати екологічний і токсикологічний слід шляхом переходу до концепції локального та сезонного споживання.

Це лише перша частина навчального посібника, яка закладає фундаментальні екологічні, хімічні та біологічні основи безпеки сировини на етапі її отримання в агросфері. Наступна, друга частина буде присвячена детальному розбору технологічних аспектів безпеки, де ми детально розглянемо екотоксикологічні ризики глибокої промислової переробки сировини, екологію та безпеку сучасного харчового пакування, біологічні компроміси використання генетично модифікованих організмів, радіаційну безпеку продовольства, а також державні та міжнародні механізми екологічного регулювання, стандартизації та сертифікації споживчого ринку.

Для глибшого засвоєння викладеного матеріалу та розвитку дослідницької компетентності студентам рекомендується детально опрацювати наведений список літератури. Він складається переважно з оригінальних англomовних наукових праць у провідних світових рецензованих виданнях, а також чинних міжнародних нормативних документів і регламентів.

Самостійний аналіз цих першоджерел є критично важливим етапом навчання для майбутніх магістрів-екологів, які прагнуть стати висококласними професіоналами, здатними вільно орієнтуватися у світових трендах екологічного моніторингу та ефективно вирішувати складні прикладні завдання у сфері безпеки навколишнього середовища та здоров'я людини.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Thomas D. A study on the mineral depletion of the foods available to us as a nation over the period 1940 to 1991. *Nutr Health*. 2003;17(2):85-115. doi: 10.1177/026010600301700201. PMID: 14653505.
2. Davis DR, Epp MD, Riordan HD. Changes in USDA food composition data for 43 garden crops, 1950 to 1999. *J Am Coll Nutr*. 2004 Dec;23(6):669-82. doi: 10.1080/07315724.2004.10719409. PMID: 15637215.
3. Cassan O, Pimpare LL, Mozzanino T, Fizames C, Devidal S, Roux F, Milcu A, Lebre S, Gojon A, Martin A. Natural genetic variation underlying the negative effect of elevated CO₂ on ionome composition in *Arabidopsis thaliana*. *Elife*. 2024 May 23;12:RP90170. doi: 10.7554/eLife.90170. PMID: 38780431; PMCID: PMC11115449.
4. Adam NR, Wall GW, Kimball BA, Pinter PJ, LaMorte RL, Hunsaker DJ, Adamsen FJ, Thompson T, Matthias AD, Leavitt SW, Webber AN. 2000. Acclimation response of spring wheat in a free-air CO₂ enrichment (FACE) atmosphere with variable soil nitrogen regimes. 1. Leaf position and phenology determine acclimation response. *Photosynthesis Research* 66: 65–77.
5. Ainsworth EA, Rogers A, Blum H, Nosberger J, Long SP. 2003. Variation in acclimation of photosynthesis in *Trifolium repens* after eight years of exposure to free air CO₂ enrichment (FACE). *Journal of Experimental Botany* 54: 2769–2774.
6. L.H. Allen, B.A. Kimball, J.A. Bunce, M. Yoshimoto, Y. Harazono, J.T. Baker, K.J. Boote, J.W. White, Fluctuations of CO₂ in Free-Air CO₂ Enrichment (FACE) depress plant photosynthesis, growth, and yield. *Agricultural and Forest Meteorology*. - Volume 284, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107899>.
7. Commission Regulation (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC) No 1831/2003. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/915/oj>
8. Наказ № 368 від 13.05.2013 Про затвердження Державних гігієнічних правил і норм "Регламент максимальних рівнів окремих забруднюючих речовин у харчових продуктах". URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0774-13/ed20130513#Text>
9. Singhato A, Rueangsri N, Thanaratsotornkun P, Boonyingsathit K, Sridonpai P, Laitip N, Ornthai N, Judprasong K. Risk Assessment of Toxic Heavy Metal Exposure in Selected Seafood Species from Thailand. *Foods*. 2025 Oct 30;14(21):3725. doi: 10.3390/foods14213725. PMID: 41227695; PMCID: PMC12607330.
10. Raab A, Baskaran C, Feldmann J, Meharg AA. Cooking rice in a high water to rice ratio reduces inorganic arsenic content. *J Environ Monit*. 2009 Jan;11(1):41-4. doi: 10.1039/b816906c. Epub 2008 Nov 20. PMID: 19137137.
11. Nitrate in vegetables Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food chain. *The EFSA Journal* (2008) 689, 1-79
12. Bajwa U, Sandhu KS. Effect of handling and processing on pesticide residues in food- a review. *J Food Sci Technol*. 2014 Feb;51(2):201-20. doi: 10.1007/s13197-011-0499-5. Epub 2011 Aug 26. PMID: 24493878; PMCID: PMC3907644.
13. Amir RM, Randhawa MA, Nadeem M, Ahmed A, Ahmad A, Khan MR, Khan MA, Kausar R. Assessing and Reporting Household Chemicals as a Novel Tool to Mitigate Pesticide

Residues in Spinach (*Spinacia oleracea*). *Sci Rep*. 2019 Feb 4;9(1):1125. doi: 10.1038/s41598-018-37936-2. PMID: 30718746; PMCID: PMC6362137.

14. Athina Papadopoulou, Alexios-Serafeim Konstantoulis, Ioannis Chrysovalantis Maziotis, Konstantinos Fragkos, Rafail Kitsos, Vasiliki Boti, Christina Nannou. Effectiveness of household and industrial washing methods on pesticide residue removal from tomatoes: Insights from QuEChERS and LC-HRMS analysis. *Microchemical Journal* **2026**, 220 , 116559. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.116559>

15. Jose Satoshi Flores Takahashi, Daniel Schwantes, Affonso Celso Gonçalves, Denis Fuentealba, Héctor Valdés Gómez, Angélica de Fatima Bortolato Piccioli. Efficiency of combined techniques in pesticide residues removal from food: a systematic review. *Food Production, Processing and Nutrition* **2025**, 7 (1) <https://doi.org/10.1186/s43014-024-00290-0>

16. Li, M., Jia, N., Lenzen, M. *et al.* Global food-miles account for nearly 20% of total food-systems emissions. *Nat Food* **3**, 445–453 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00531-w>

17. Екологізація харчових виробництв : Підручник для студентів вищих навчальних закладів / Анатолій Запольський, Анатолій Українець, . - К. : Вища школа, 2005. - 428,[1] с. : табл. - Бібліогр.: с. 419; Предм. покажч.: с. 420-423.

18. Безпека харчування: сучасні проблеми : Посібник-довідник / Укл. А. В. Бабюк, О. В. Макарова, М. С. Рогозинський, Л. В. Романів, О. Є. Федорова. - Чернівці : Книги-XXI, 2005. – 454 с.

19. Екологічна безпека продуктів харчування : навчальний посібник / О. М. Крайнюков, А. Н. Некос, Я. О. Білецька. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2023. – 120 с