

Науковий вісник Львівського національного університету
ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького.

Серія: Ветеринарні науки

Scientific Messenger of Lviv National University
of Veterinary Medicine and Biotechnologies.

Series: Veterinary sciences

ISSN 2518–7554 print
ISSN 2518–1327 online

doi: 10.32718/nvlvet11001
<https://nvlvet.com.ua/index.php/journal>

UDC 619:615.918:633.15:582.28

Optimum parameters of deoxynivalenol synthesis by micromycete *F. graminearum* on grain substrates

D. Ostrovskiy[✉], V. Zotsenko, V. Grishko

Bila Tserkva National Agrarian University, Bila Tserkva, Ukraine

Article info

Received 13.03.2023

Received in revised form

17.04.2023

Accepted 18.04.2023

Bila Tserkva National Agrarian
University, Pl. Soborna 8/1,
Bila Tserkva, Kyiv region,
09117, Ukraine.
Tel.: +38-097-911-33-60
E-mail: denostr@meta.ua

Ostrovskiy, D., Zotsenko, V., & Grishko, V. (2023). Optimum parameters of deoxynivalenol synthesis by micromycete *F. graminearum* on grain substrates. Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Veterinary sciences, 25(110), 3–8. doi: 10.32718/nvlvet11001

Today, fusariotoxins play an increasingly important role in the pathology of farm animals, among which deoxynivalenol plays an important role. Deoxynivalenol (DON) is one of the most common fusariotoxins. It affects the health of animals that consume contaminated feed, and can lead to various metabolic disorders, disrupting the body's homeostasis. One of the main effects of deoxynivalenol is that it stimulates the production of anti-inflammatory cytokines, which in turn causes the acute phase of inflammation in animals. In addition, deoxynivalenol leads to a decrease in appetite and can cause hypophagia in animals, which in turn leads to a decrease in daily gains. The direction of the conducted research is aimed at identifying the optimal substrate for the synthesis of deoxynivalenol and its maximum accumulation by the fungus *F. graminearum*, and also established the optimal parameters for the synthesis of mycotoxin (cultivation temperature, substrate humidity, cultivation period). Grains of the following crops were used as substrates: wheat, rice, corn, barley, oats, rye, millet, millet, peas, soybeans, sunflower, mustard, rapeseed, buckwheat, and flax. Deoxynivalenol in samples was determined by thin-layer chromatography. The production of deoxynivalenol was studied in the temperature ranges of 4, 17, 24, and 28 °C; humidity of the substrate in the range from 14–90 % and the duration of cultivation from 1 to 4 weeks. The mycotoxin-producing activity of the fungus *F. graminearum* isolate 195/1 was largely determined by the studied parameters. The maximum amount of deoxynivalenol was produced at a temperature of 24 °C, a substrate humidity of 50%, and a duration of cultivation of 24 days. Of the tested substrates, rice was the best for deoxynivalenol production. The obtained results serve as a basis for possible prediction of feed contamination with deoxynivalenol and, in general, will allow to optimize measures to combat mycotoxicosis and thus minimize the possible risks of mycotoxin poisoning of people and animals.

Key words: *F. graminearum*, grain substrates, deoxynivalenol, cultivation temperature, substrate humidity, duration of cultivation.

Оптимальні параметри синтезу дезоксиніваленолу мікроміцетом *F. graminearum* на зернових субстратах

Д. М. Островський[✉], В. М. Зоценко, В. А. Гришко

Білоцерківський національний аграрний університет, м. Біла Церква, Україна

Сьогодні в світі все більшого значення у патології сільськогосподарських тварин відіграють фузаріотоксини, серед яких важлива роль належить дезоксиніваленолу. Дезоксиніваленол (DON) є одним з найпоширеніших фузаріотоксинів. Він впливає на здоров'я тварин, що споживають забруднений корм, та може призводити до різноманітних порушень обмінних процесів порушуючи гомеостаз організму. Один з основних ефектів дезоксиніваленолу полягає в тому, що він стимулює продукцію протизапальних цитокінів, що в свою чергу спричиняє гостру фазу запалення у тварин. Крім того, дезоксиніваленол призводить до зниження апетиту та може спричинити гіпофагію у тварин, що в кінцевому результаті обумовлює зниження добових приростів.

Дослідження спрямовано на виявлення оптимального субстрату для синтезу дезоксиніваленолу та максимального його накопичення грибом *F. graminearum*, також встановлено оптимальні параметри для синтезу мікотоксину (температура культивування, вологість субстрату, термін культивування). В якості субстратів використовували зерно таких культур: пшениці, рису, кукурудзи, ячменю, вівса, жита, проса, пшона, гороху, сої, соняшнику, гірчиці, ріпаку, гречки та льону. Дезоксиніваленол у пробах визначали методом тонкошарової хроматографії. Продуктування дезоксиніваленолу вивчали в діапазонах температур 4, 17, 24 та 28 °C; вологості субстрату в межах від 14–90 % і тривалості культивування від 1 до 4 тижнів. Мікотоксин продукуюча активність гриба *F. graminearum* ізолят 195/1 значною мірою визначалась досліджуваними параметрами. Максимальна кількість дезоксиніваленолу продукувалась за температури 24 °C, вологості субстрату 50 %, тривалістю культивування 24 доби. Із апробованих субстратів найкращим для продукції дезоксиніваленолу виявився рис. Отримані результати слугують основою для можливого прогнозування забруднення кормів дезоксиніваленолом і в цілому дозволять оптимізувати заходи боротьби з мікотоксикозами і таким чином мінімізувати можливі ризики отруєння мікотоксинами людей та тварин.

Ключові слова: *F. graminearum*, зернові субстрати, дезоксиніваленол, температура культивування, вологість субстрату, тривалість культивування.

Вступ

Нині у науковій літературі все більше і частіше з'являються матеріали наукових досліджень стосовно випадків отруєнь мікотоксинами тварин і людини, при накопиченні їх у зернових кормах та харчових продуктах. Так, за повідомленнями департаменту харчування та сільського господарства ООН ФАО, на початку ХХІ століття 25 % зернових культур було забруднене мікотоксинами, а на даний час існують дані про забруднення навіть 80 % світового врожаю зерна (Pohland et al., 1998; Kaminska, 2020; Brezvy et al., 2021).

Щорічні збитки від ураження культурних зернових грибами, забруднення зерна мікотоксинами, недоотримання продукції та загибелі тварин в США складають понад 20 млрд. доларів і мають тенденцію до збільшення. За економічними розрахунками це може призвести до втрати 40 % врожаю (Yigezu et al., 2021). Лише десять років тому світові втрати врожаю зерна, пов'язані з контамінацією спорами грибів та їх токсинами становили 2 млрд. доларів на рік.

Найбільше значення у патології сільськогосподарських тварин відіграють фузаріотоксини, серед яких важлива роль належить дезоксиніваленолу. Дезоксиніваленол (DON) є одним з найпоширеніших фузаріотоксинів. Він може впливати на здоров'я тварин, що споживають забруднений корм, та призводити до різноманітних порушень. Один з основних ефектів дезоксиніваленолу полягає в тому, що він стимулює продукцію протизапальних цитокінів, що може спричинити гостру фазу запалення у тварин. Крім того, дезоксиніваленол може знижувати апетит та спричинити гіпофагію у тварин, що призводить до зниження добових приростів та ваги (Kumar et al., 2008; Schmidt et al., 2016).

За отруєння дезоксиніваленолом у тварин також може спостерігатися гіпертермія, блювання та інші порушення травлення. У промисловому птахівництві за споживання забрудненого дезоксиніваленолом корму може спостерігатися зниження яйценосності.

Забруднення мікотоксинами може відбуватися на різних етапах вирощування, зберігання та обробки зернових культур та продуктів їх переробки. Факторами, що впливають на накопичення дезоксиніваленолу є температура та вологість.

Мікотоксини можуть мати різні механізми впливу на здоров'я людини та тварин, включаючи алергічні реакції, токсичні ефекти на печінку, нирки та інші

органи та є потужними канцерогенними. Також, мікотоксини можуть знижувати якість продуктів та призводити до масштабних збитків для сільськогосподарських підприємств та переробної галузі (Xu et al., 2018; Abbas & Yli-Mattila, 2022).

Недостатність досліджень щодо встановлення чітких умов для синтезу дезоксиніваленолу не дозволяє передбачати та прогнозувати майбутні забруднення злакових культур мікотоксином в залежності від фізичних умов навколишнього середовища окремих кліматичних зон України. Тому проведені дослідження, спрямовані на вирішення питання щодо дослідження факторів, що сприяють синтезу дезоксиніваленолу у зернових культурах та продуктах їх переробки, підбір субстрату, його вологості, температури та терміну культивування.

Мета дослідження

Встановити оптимальні режими температури вологості та часові режими для максимальної продукції мікроміцетами дезоксиніваленолу на різних зернових субстратах.

Матеріал і методи дослідження

Дослідження виконані на кафедрі мікробіології та вірусології Білоцерківського НАУ. Оскільки на різних зернових субстратах *F. graminearum* росте по-різному, то і кількість синтезованого ДОНу відповідно буде відрізнятися. Тому нам необхідне було вибрати субстрату для оптимального біосинтезу. Як інокулюм використовували *F. graminearum* ізолят 195/1, а як субстрати використовували зерна пшениці, рису, кукурудзи, ячменю, вівса, жита, проса, пшона, гороху, сої, соняшнику, гірчиці, ріпаку, гречки та льону. Наважки відповідних зерен масою 10,0 г вносили в 100 мл колби, зволожували до вологості 50 % і стерилізували автоклавуванням при 1 атм. за температури 121 °C протягом години. Після охолодження колб з субстратами в них у стерильних умовах вносили культуру гриба *F. graminearum* ізолят 195/1. Посіви культивували в термостаті за температури 28 °C протягом 24 днів. Потім зернові субстрати висушували, подрібнювали і екстракцію токсину проводили 15,0 мл суміші ацетонітрил:вода (3:1) дворазово по одній годині, після чого екстракти фільтрували через паперовий фільтр, а розчинники випарювали в потоці повітря. Після очистки за використання колонок у які

додавали 0,75 г порошку активованого вугілля, та шар – 0,75 г окису алюмінію у екстрактах визначали наявність токсину (Образhei et al., 1998).

Після визначення субстратів на яких найбільше утворювався ДОН нами було поставлене завдання щодо визначення оптимальної температури для синтезу токсину. Для виконання поставленого завдання нами було використано три субстрати зерна: рис, кукурудза, пшениця. Після посіву гриба *F. graminearum* ізолят 195/1 на зволожені субстрати у колби їх утримували за різних температур + 4 °С, + 12 °С, + 17 °С, + 24 °С, + 37 °С тривалістю 24 доби. Після субстрати висушували, подрібнювали і екстрагували розчином ацетонітрил:вода (3:1), екстракти очищали за допомогою колонок і наносили на пластини для розподілу на ТШХ.

Наступним етапом досліджень було визначення оптимальної вологості зернових субстратів для синтезу ДОНу грибом *F. graminearum* ізолят 195/1. Для досліджень використовували зерно: рису, кукурудзи та пшениці, оскільки вони найчастіше використовуються для годівлі тварин. Після посіву гриба *F. graminearum* ізолят 195/1 на зазначені субстрати у колби з вологістю від 20 до 90 % їх витримували у термостаті за температури 24–26 °С тривалістю 24 доби.

Оскільки в літературі лише частково описані дані, щодо оптимального терміну культивування для максимальної продукції ДОНу ми вирішити і ці фактори для гриба *F. graminearum* ізолят 195/1. У досліді нами було використано чотири субстрати: зерна пшениці, кукурудзи, рису та пшона. Гриб *F. graminearum* ізолят 195/1 інокулювали на попередньо зволожені до 50 % субстрати по чотири колби кожного зерна. Колби витримували в термостаті за температури 24 – 26 °С і через 7, 14, 21 та 28 діб культивування по 1 колбі піддавали дослідженню щодо вмісту ДОНу, що дозволило отримати дані щотижневої динаміки накопичення токсину.

Результати дослідження

Оскільки на зерні різних культур *F. graminearum* росте по-різному, то і синтез дезоксиніваленолу відповідно відрізняється.

В посівах *F. graminearum* ізолят 195/1 спостерігали гарний ріст гриба на усіх зернових субстратах, проте інтенсивність токсинуотворення було не однаковим. Найбільшу кількість дезоксиніваленолу виявили на зерні рису, пшона і кукурудзи, на зерні пшениці і ячменю токсину утворювалось менше і зовсім мало – на зернах сої та льону, а на інших зернових субстратах його взагалі не було виявлено (рис. 1).

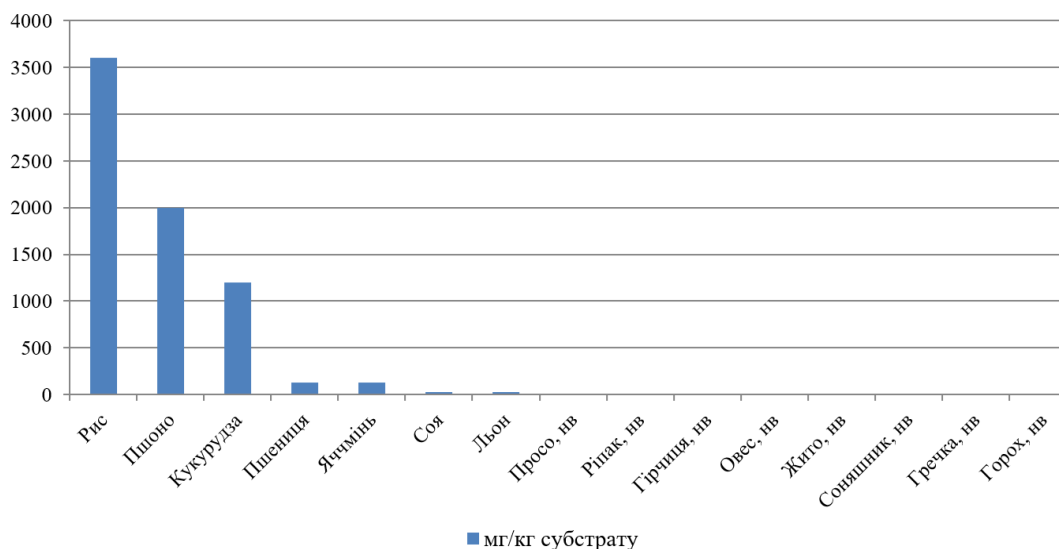


Рис. 1. Синтез дезоксиніваленолу ізолятом 195/1 *F. graminearum* залежно від виду зернового субстрату мг/кг
Примітка: “нв” – не виявлено

Варто зазначити, що субстрати з найбільшим накопиченням дезоксиніваленолу (рис, пшона та кукурудза) мають у своєму хімічному складі 70–78 % вуглеводів, від 8 до 15 % білку та до 6 % жирів. Крім цього, вони містять багато мікро-, макроелементів та вітамінів. Можливо, саме такий хімічний склад є оптимальним для максимального накопичення дезоксиніваленолу у субстраті грибом *F. graminearum* ізолят 195/1.

В результаті досліджень з визначення впливу температури на синтез мікотоксину ДОНу встановлено, що він був виявлений в усіх трьох субстратах: рисі,

кукурудзі і пшениці за температур 17 та 24 °С, при цьому кількість утвореного дезоксиніваленолу була найбільшою за температури 24 °С. За температури культивування субстрату 37 °С на зразках зерна вище згаданих культур ріст гриба *F. graminearum* ізолят 195/1 візуально не виявлено (табл. 1).

В результаті проведених досліджень можна стверджувати, що *F. graminearum* ізолят 195/1 продукує ДОН на вищезгаданих зразках зернових культур, за температур культивування субстрату в межах від 17 до 24 °С, а за температури понад 37 °С взагалі не спостерігали росту.

Таблиця 1

Вплив температури культивування на продукцію дезоксиніваленолу *F. graminearum* ізолятом 195/1 ($M \pm m$; $n = 15$)

Субстрат	Температура, °C	Кількість токсину мг/кг субстрату
Пшениця	4	Не виявлено
	12	Не виявлено
	17	50 ± 1,47
	24	130 ± 3,96
	37	Не виявлено
Кукурудза	4	Не виявлено
	12	Сліди
	17	700 ± 16,41
	24	1200 ± 21,33
	37	Не виявлено
Рис	4	Не виявлено
	12	Сліди
	17	2400 ± 22,48
	24	3500 ± 29,74
	37	Не виявлено

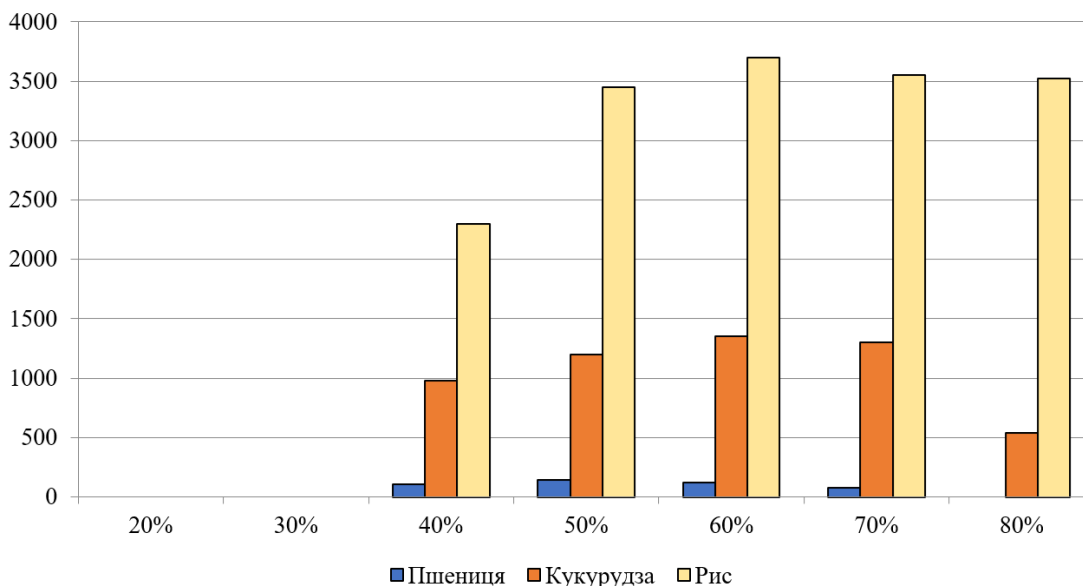


Рис. 2. Продукція дезоксиніваленолу *F. graminearum* ізолятом 195/1 залежно від вологості субстрату

Наступним етапом досліджень було визначення оптимальної вологості зернових субстратів для синтезу ДОНу грибом *F. graminearum* ізолят 195/1. Для цього використали зерна рису, кукурудзи та пшениці.

Мікотоксикологічними дослідженнями було встановлено, що найоптимальніша вологість субстрату для синтезу дезоксиніваленолу становила від 40 до 80 %.

Найбільше ДОНу утворювалось на зерні пшениці за вологості субстрату 50 %, на кукурудзі за 60–70 %, на рисі за 60–80 %. За вологості 20 і 30 % активного росту гриба *F. graminearum* ізолят 195/1 не спостерігали (рис. 2).

Дослідженнями встановлено, що у зерні кукурудзи гриб *F. graminearum* ізолят 195/1 почав синтезувати

дезоксиніваленон після другого тижня культивування, а після третього його токсиноутворююча здатність була максимальною. У зерні пшениці токсин виявляли після першого тижня культивування. Тенденція, щодо кількості накопичення кількості ДОНу спостерігали аж до третього тижня, а потім відбувалося зменшення токсиноутворення. На пшони і рисі динаміка накопичення дезоксиніваленолу виявилася схожою з зерновими субстратами на основі пшениці та кукурудзи, а накопичення мінімальні кількості токсину були виявлені лише після третього тижня, а максимальну кількість накопичення токсину спостерігали через чотири тижні культивування *F. graminearum* ізолят 195/1 (табл. 2).

Таблиця 2

Продукція дезоксиніваленолу грибом *F. graminearum* ізолят 195/1 за різних термінів культивування ($M \pm m$; $n = 16$)

Субстрат	Температура 24–26 °С	Термін культивування, днів			
		7	14	21	28
Пшениця		35 ± 1,23	90 ± 2,35	135 ± 3,72	110 ± 2,88
Кукурудза	Кількість токсину мг/кг субстрату	нв	1150 ± 20,66	1250 ± 21,83	1180 ± 20,45
Рис		нв	нв	сліди	3650 ± 27,62
Пшоно		нв	нв	сліди	2100 ± 20,49

Примітка: “нв” – не виявлено

Таким чином, було доведено, що на різних субстратах гриб *F. graminearum* ізолят 195/1 утворює дезоксиніваленол з різною інтенсивністю, що залежить від тривалості цього процесу.

Обговорення

В результаті мікотоксикологічних досліджень встановлено, що режим температури і вологості навколишнього середовища значною мірою впливають на синтез мікотоксинів і зокрема дезоксиніваленолу (Scala et al., 2016; Rahman et al., 2018). Аналізуючи результати досліджень з наукових публікацій різних дослідників нами не було встановлено чіткі фактори, що впливають на синтез дезоксиніваленолу. Тому нами було зроблено висновок, що одностайної думки у дослідників, щодо впливу температури вологості та терміну культивування на продукцію дезоксиніваленолу немає. Деякі науковці стверджують, що максимальна продукція токсину ізолятом *F. graminearum* відбувається за температури 28–29 °С і залежить від регіону вирощування зернових культур (Shah et al., 2018; Abbas & Yli-Mattila, 2022). В інших наукових працях повідомляється, що культивування *F. graminearum* за температури 22–25 °С дозволяє отримати дезоксиніваленол в кількості 13000 мкг/кг субстрату (Beccari et al., 2019). Проте існують і протилежні дані, що за температури 19–20 °С дезоксиніваленолу синтезувалось більше ніж за температури 23–25 °С (Hay et al., 2021). В наукових дослідженнях авторів показано, що за температур 22–26 °С і вологості від 40 до 90 % отримували дезоксиніваленол в кількості від 455–684 мкг/кг (Gagiu et al., 2017; Bonfada et al., 2019).

За результатами досліджень (Yu et al., 2018) встановлено, що оптимальні умови синтезу дезоксиніваленолу спостерігались за температури 20 °С і найбільша його кількість при культивуванні протягом 7 і 14 днів. Отримані дані (Scala et al., 2016) свідчать, що дезоксиніваленол синтезувався за температури 25 °С починаючи з сьомого дня експерименту. Культивування токсигенних видів *F. graminearum* (Sayed-ElAhl et al., 2022) протягом 4 тижнів за 25–28 °С з подальшим переміщенням досліджуваного субстрату в холодильник при 8–10 °С на 2 тижні дозволили отримати максимальний рівень токсину. В публікаціях (Mirabolfathy et al., 2013) описано, що зміна субстрату також має вплив на синтез дезоксиніваленолу. Вивчення синтезу дезоксиніваленолу на рисовому порошковому середовищі за температури 25 °С, виявило максимальний його вміст на 10 день експерименту.

Ряд дослідників отримували дезоксиніваленол зі штаму *F. graminearum* I159 на пшениці при температурі культивування 23 °С і терміну інкубування 4 тижні (Metayer et al., 2019).

Проведені нами дослідження, щодо впливу санітарно-гігієнічних та часових факторів на синтез дезоксиніваленолу мікроміцетом *F. graminearum* ізолят 195/1 також показало різні результати на різних субстратах зернових культур. За результатами наших досліджень найкращим зерновим субстратом для синтезу мікроміцетом *F. graminearum* ізолят 195/1 дезоксиніваленолу є рис. Менш оптимальними для синтезу ДОНу є зернові субстрати на основі зерна пшоно, кукурудзи та пшениці. Найбільш інтенсивно синтез ДОНу на пшеничному, кукурудзяному та рисовому субстратах відбувався за температури 24 °С. Найбільш оптимальною вологістю для синтезу ДОНу для зернового субстрату на основі пшениці є 50 %, на основі кукурудзи та рису – 60 %. Найвища токсиносинтезуюча активність мікроміцету *F. graminearum* ізолят 195/1 на субстратах пшениці і кукурудзи була встановлена на 21 добу культивування, а для рису та пшоно на 28 добу.

Розбіжності з результатами отриманими різними авторами при вивченні режимів температури та вологості на токсинопродукуючу активність фузарій можна пояснити використанням різних штамів мікроміцетів.

Перспективи подальших досліджень. В подальших експериментах буде вивчено токсинопродукуючу здатність різних штамів за режиму температури і вологості та часових термінів описаних нами.

Висновки

Оптимальними параметрами для утворення ДОНу грибом *F. graminearum* ізолят 195/1 є температура 24 °С, вологість субстрату 50 % та термін культивування 24 доби. Найбільше токсину синтезувалось на рисовому субстраті.

Відомості про конфлікт інтересів

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів у даній роботі.

References

Abbas, A., & Yli-Mattila, T. (2022). Biocontrol of *Fusarium graminearum*, a Causal Agent of Fusarium Head Blight of Wheat, and Deoxynivalenol

- Accumulation: From In Vitro to In Planta. *Toxins*, 14(5), 299. DOI: 10.3390/toxins14050299.
- Beccari, G., Arellano, C., Covarelli, L., Tini, F., Sulyok, M., & Cowger, C. (2019). Effect of wheat infection timing on *Fusarium* head blight causal agents and secondary metabolites in grain. *International journal of food microbiology*, 290, 214–225. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2018.10.014.
- Bonfada, É. B., Honnef, D., Friedrich, M. T., Boller, W., & Deuner, C. C. (2019). Performance of fungicides on the control of fusarium head blight (*Triticum aestivum* L.) and deoxynivalenol contamination in wheat grains. *Summa Phytopathologica*, 45(4), 374–380. DOI: 10.1590/0100-5405/191941.
- Brezvyn, O. M., Guta, Z. A., Gutyj, B. V., Fijalovych, L. M., Karpovskiy, V. I., Shnaider, V. L., Farionik, T. V., Dankovych, R. S., Lisovska, T. O., Bushuieva, I. V., Parchenko, V. V., Magrelo, N. V., Slobodjuk, N. M., Demus, N. V., & Leskiv, Kh. Ya. (2021). The influence of HamekoTox on the morphological and biochemical indices of the blood of laying hens in spontaneous fumonisin toxicosis. *Ukrainian Journal of Ecology*, 11(2), 249–253. DOI: 10.15421/2021_107.
- Gagiu, V., Mateescu, E., Smeu, I., Dobre, A. A., Cucu, M. E., Oprea, O. A. et al. (2017). A survey of the cereal contamination with deoxynivalenol in Romania, for 2011–2013 period. *Romanian Biotechnological Letters*, 22(1), 12240–12249. URL: https://www.rombio.eu/vol22nr1/---11_V.Gagiu_Final__17.02.2017_.pdf.
- Hay, W. T., McCormick, S. P., & Vaughan, M. M. (2021). Effects of Atmospheric CO₂ and Temperature on Wheat and Corn Susceptibility to *Fusarium graminearum* and Deoxynivalenol Contamination. *Plants*, 10(12), 2582. DOI: 10.3390/plants10122582.
- Kaminska, O. V. (2020). Toxinogenic micromycetes of the genus *Fusarium*, biological substantiation of measures to limit the accumulation of their secondary metabolites in winter wheat and corn in the right-bank forest-steppe of Ukraine. Candidate [dissertation]. Kyiv (in Ukrainian).
- Kumar, V., Basu, M. S., & Rajendran, T. P. (2008). Mycotoxin research and mycoflora in some commercially important agricultural commodities. *Crop protection*, 27, 891–905. DOI: 10.1016/j.cropro.2007.12.011.
- Metayer, J. P., Travel, A., Mika, A., Bailly, J.D., Cleva, D., Boissieu, C. et al. (2019). Lack of Toxic Interaction Between Fusariotoxins in Broiler Chickens Fed throughout Their Life at the Highest Level Tolerated in the European Union. *Toxins*, 11(8), 455. DOI: 10.3390/toxins11080455.
- Mirabolfathy, M., & Karamiosboo, R. (2012). Deoxynivalenol and don – producing fusarium graminearum isolates in wheat and barley crops in north and northwest areas of Iran. *Iranian journal of plant pathology*, 48(4), 197–210.
- Obrazheĭ A. F. ta in. (1998). Metodychni vkazivky po sanitarno-mikolohichnii otsintsi ta polipshenniu yakosti kormiv. Zatverdzheni Derzhavnym departamentom veterynarnoi medytsyny Ministerstvom APK Ukrainy (№ 15-14-73 vid 06.03.1998 r.). Kyiv (in Ukrainian).
- Pohland, A. E., Miraglia, M., Egmond, H. P., Brera, C., & Gilbert, J. (1998). Overview of international mycotoxin and phycotoxin programs. eds. *Mycotoxins and Phycotoxins – Development in Chemistry, Toxicology and Food Safety*. Fort Collins, CO: Alaken, 17–24.
- Rahman, A., Riffat, T., Aqleem, A., Shahid, I., Israr, A., & Waseem, A. (2018). Screening of wheat germplasm for seed associated fungi in geographical areas of Pakistan. *African Journal of Agricultural Research*, 13, 258–271. DOI: 10.5897/AJAR2015.9825.
- Riahi, I., Marquis, V., Ramos, A.J., Brufau, J., Esteve-Garcia, E., & Pérez-Vendrell, A. M. (2020). Effects of deoxynivalenol-contaminated diets on productive, morphological, and physiological indicators in broiler chickens. *Animals*, 10(10), 1795. DOI: 10.3390/ani10101795.
- Sayed-ElAhl, R. M. H., Hassan, A. A., Mansour, M. K., Abdelmoteleb, A. M., & El-Hamaky, A. M. A. (2022). Controlling Immunomodulation Effects of Deoxynivalenol Mycotoxins by NanoZinc Oxide and Probiotic in Broiler Chickens. *Journal of World's Poultry Research*, 12(3), 133–141. DOI: 10.36380/JWPR.2022.15.
- Scala, V., Aureli, G., Cesarano, G., Incerti, G., Fanelli, C., Scala, F. et al. (2016). Affect *Fusarium* Head Blight Incidence and Deoxynivalenol Accumulation in Durum Wheat of Southern Italy. *Frontiers in microbiology*, 7, 1014. DOI: 10.3389/fmicb.2016.01014.
- Schmidt, M., Horstmann, S., De Colli, L., Danaher, M., Speer, K., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2016). Impact of fungal contamination of wheat on grain quality criteria. *Journal of Cereal Science*, 69, 95–103. DOI: 10.1016/j.jcs.2016.02.010.
- Shah, L., Ali, A., Yahya, M., Zhu, Y., Wang, S., Si, H., Rahman, H., & Ma, C. (2018). Integrated control of fusarium head blight and deoxynivalenol mycotoxin in wheat. *Plant pathology*, 67(3), 532–548. DOI: 10.1111/ppa.12785.
- Xu, F., Yang, G., Wang, J., Song, Y., Liu, L., Zhao, K. et al. (2018). Spatial Distribution of Root and Crown Rot Fungi Associated With Winter Wheat in the North China Plain and Its Relationship With Climate Variables. *Frontiers in microbiology*, 9, 1054. DOI: 10.3389/fmicb.2018.01054.
- Yigezu, Y. A., Moustafa, M. A., Mohiy, M. M., Ibrahim, S. E., Ghanem, W. M., Niane, A. A., Abbas, E., Sabry, S. R. S., & Halila, H. (2021). Food Losses and Wastage along the Wheat Value Chain in Egypt and Their Implications on Food and Energy Security, Natural Resources, and the Environment. *Sustainability*, 13(18), 10011. DOI: 10.3390/su131810011.
- Yu, Y. H., Hsiao, F. S., Proskura, W. S., Dybus, A., Siao, Y. H., & Cheng, Y. H. (2018). An impact of Deoxynivalenol produced by *Fusarium graminearum* on broiler chickens. *Journal of animal physiology and animal nutrition*, 102(4), 1012–1019. DOI: 10.1111/jpn.12883.