

О. Л. Січняк, к.б.н., доцент,

С. Л. Міресь, к.б.н., доцент,

К. О. Довганюк, магістр

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,

кафедра генетики та молекулярної біології,

вул. Дворянська, 2, Одеса, 65082, Україна, e-mail: a.sechnyak@onu.edu.ua

ЦИТОГЕНЕТИЧНІ ЕФЕКТИ *FUSARIUM GRAMINEARUM* SCHWABE НА ЗЛАКОВІ КУЛЬТУРИ

Досліджували вплив інокулюма *Fusarium graminearum* Schwabe на паростки ячменю та м'якої пшениці. Метаболіти інокулюма достовірно знижують енергію проростання і схожість насіння, а також мітотичний індекс кореневої меристеми м'якої пшениці та ячменю. За їх впливу достовірно збільшилась частка клітин з порушеннями. Спостерігали хромосомні аберації, відбитком яких було утворення мостів, фрагментів та відставання хромосом, а також асиметричний мітоз та комплексні порушення мітозу.

Ключові слова: *Fusarium graminearum*; пшениця м'яка; ячмінь; мітотичний індекс; анафазний тест; порушення мітозу.

В Україні фузаріоз зернових культур проявляється масштабно та стабільно. Крім значних втрат врожаю, він погіршує якість вирощеної продукції [10]. Фузаріоз колосу широко розповсюджений у зоні культивування пшениці (*Triticum aestivum* L.) та ячменю (*Hordeum vulgare* L.). У всьому світі хвороба викликає значні економічні втрати через зниження врожаю та якості зерна [21]. *Fusarium graminearum* заражає колосся і, як наслідок, насіння часто містить трихотеценові мікотоксини, що становить небезпеку для тварин і людей [16].

Види *Fusarium* заражають ячмінь після цвітіння [13] и заселяють епітеліальні волоски зав'язі з наступною інвазією в каріопсис [25]. У пшениці колос також заражається під час цвітіння, однак гриб спочатку колонізує поверхню квіток, а потім проникає у їх тканини і розповсюджується по колосу, що врешті-решт призводить до ушкодження всього колосу [12]. У пшениці виділяють резистентність типу I (стійкість до вихідної інфекції) і типу II (стійкість до розповсюдження інфекції) [22]. Для ячменю характерна наявність природної стійкості II типу: симптоми хвороби не розповсюджуються в колосі навіть у сприйнятливих сортів [13]. Під час інфекції *F. graminearum* росте у міжклітинному просторі без симптомів, а потім проникає у середину клітин і викликає загибель клітин рослини-господаря [11]. Вірулентність *F. graminearum* пов'язана з експресією генів, які кодують ферменти деградації клітинної стінки рослин,

протеази, ліпази і ферменти для біосинтезу трихоценів [18, 26]. Чимало робіт присвячені відповіді ячменю та пшениці на інфекцію *F. graminearum*, ідентифіковані гени, які забезпечують стійкість рослин до патогенів [14].

Мікотоксинам фузаріуму властива не лише загальна токсичність, але й є відомості про прояви цитогенетичної генотоксичності [3]. Є ряд робіт, в яких досліджуються цитогенетичні ефекти окремих мікотоксинів [7, 23, 24, 27]. Однак набагато більша увага приділяється впливу мікотоксинів на організм людини і тварин.

Метою даної роботи була оцінка цитогенетичної генотоксичності інокулюму *Fusarium graminearum* Schwabe на паростках ячменю та м'якої пшениці. Цей вид є найбільш частою причиною фузаріозу колоса і посідає друге місце серед збудників кореневих гнилей злаків у Степу України [1]. Вибір тест-об'єктів зумовлений помірною стійкістю/чутливістю зазначених культур до фузаріозу (4–5 балів).

Матеріали і методи дослідження

Матеріалом для досліджень слугували м'яка пшениця (*T. aestivum* L.) сорту Куяльник та ячмінь (*H. vulgare* L.) сорту Росава. Обидва сорти створені у Селекційно-генетичному інституті – Національному центрі насіннізнавства та сортовивчення [5].

Маточні культури інокулюму *F. graminearum* Schwabe, штам К-90 напрацьовували на рідкому солодовому середовищі [2].

Для визначення енергії проростання та схожості насіння його пророщували у чашках Петрі на вологому фільтрувальному папері у термостаті при +26 °С. У кожену чашку поміщали по 25 насінин, всього в кожному варіанті дослідження використовували 100 насінин. Енергію проростання і схожість насіння визначали згідно [6]. В контролі використовували дистильовану воду з додаванням чистого середовища, в експерименті – замість води використовували підготовлений інокулюм *F. graminearum* Schwabe. Концентрація інфекційних структур (шматочки міцелію, конідії) в 1 мл інокулюма становила $2,5 \cdot 10^6 - 10^7$.

Для цитогенетичних досліджень в кореневій меристемі насіння пророщували у чашках Петрі, чергуючи тепло та холод. Ніч перед фіксацією паростки знаходилися у холодильнику. Вранці їх переносили у тепло (ячмінь на 1 годину 40 хвилин, пшеницю – на 2,5 години). Потім корінці фіксували у оцтовому алкоголі (3:1) [8]. Генотоксичність інокулюму оцінювали за допомогою анафазного метода [4], досліджуючи кореневу меристему паростків. Фіксовані корінці забарвлювали 1 % оцтокарміном.

Отримані результати опрацьовували статистично [9], обраховуючи середні значення і похибки середніх для абсолютних величин і даних альтернативної мінливості. Для аналізу результатів використовували критерій Стюдента.

Результати досліджень та їх обговорення

Енергія проростання як пшениці, так і ячменю за дії інокулюма *F. graminearum* знизилась (табл. 1) майже у 1,5–2 рази у порівнянні з контролем ($P \leq 0,001$). Схожість насіння також істотно знизилась порівняно з контролем, хоча і в меншому ступені, ніж енергія проростання.

Таблиця 1

Енергія проростання та лабораторна схожість насіння пшениці та ячменю за дії токсинів гриба *Fusarium graminearum* Schwabe (n=100)

Вид, сорт	Контроль		Інокулюм	
	енергія проростання, %	схожість, %	енергія проростання, %	схожість, %
<i>Triticum aestivum</i> L. сорт Куяльник	86±3,5	98±1,4	58±4,9***	69±4,6***
<i>Hordeum vulgare</i> L. сорт Росава	88±3,2	96±2,8	45±5,0***	58±4,9***

Примітка: *** – різниця з контролем достовірна при $P \leq 0,001$

Зниження схожості насіння за дії інокулюма *F. graminearum* знайшло відбиток і у зменшенні мітотичного індексу в кореневій меристемі паростків (табл. 2). В обох випадках спостерігали достовірне зниження мітотичного індексу, причому ячмінь реагував на дію токсинів сильніше, пригнічення мітотичних поділів у нього було більшим, ніж у пшениці.

Таблиця 2

Мітотичний індекс (%) в кореневій меристемі паростків пшениці та ячменю за дії токсинів гриба *Fusarium graminearum* Schwabe (n=1000)

Вид, сорт	Контроль	Інокулюм
<i>Triticum aestivum</i> L. сорт Куяльник	7,1±0,8	4,8±0,7*
<i>Hordeum vulgare</i> L. сорт Росава	8,5±0,9	3,5±0,6***

Примітка: * – різниця з контролем достовірна при $P \leq 0,05$;

*** – різниця з контролем достовірна при $P \leq 0,001$

За звичайних умов частка клітин з порушеннями мітозу в кореневій меристемі паростків пшениці та ячменю була мінімальною (табл. 3), тоді як за дії інокулюма *F. graminearum* частка клітин з порушеннями мітозу суттєво зросла, у ячменю частка клітин з порушеннями була більшою, ніж у пшениці.

В кореневій меристемі паростків пшениці та ячменю за дії інокулюма *F. graminearum* спостерігали різноманітні класи порушень мітозу: хромосомні аберації, проявом яких було утворення мостів (рис. 1), фрагментів, асиметричний мітоз (рис. 2), а також комплексні порушення мітозу, тобто в одній клітині спостерігали декілька типів порушень.

Таблиця 3

Частота клітин з порушеннями мітозу в кореневій меристемі паростків пшениці та ячменю за дії токсинів гриба *Fusarium graminearum* Schwabe

Вид, сорт	Контроль	Інокулюм
<i>Triticum aestivum</i> L. сорт Куяльник	2,8±1,0	14,8±4,0**
<i>Hordeum vulgare</i> L. сорт Росава	2,5±1,4	18,5±4,1***

Примітка** – різниця з контролем достовірна при $P \leq 0,01$

*** – різниця з контролем достовірна при $P \leq 0,001$

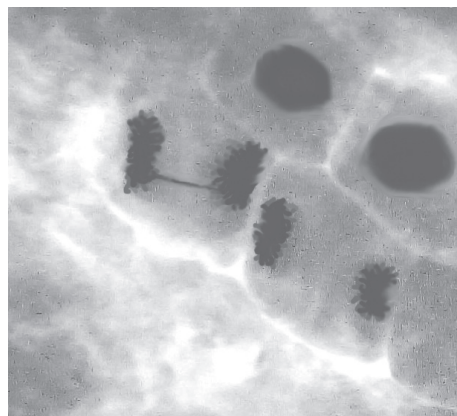


Рис. 1. Пізня анафаза з мостом.
Рання нормальна телофаза.
Окуляр $\times 40$. Об'єктив $\times 15$.



Рис. 2. Асиметричний мітоз.
Окуляр $\times 40$. Об'єктив $\times 15$.

Хромосомні аберації були найбільш частим класом порушень мітозу (табл. 4). Частота хромосомних аберацій у пшениці збільшилась майже в три рази, порівняно з контролем, а у ячменю – майже в чотири рази. Асиметричний мітоз в контролі не спостерігали, однак за дії інокулюма *F. graminearum* частка асиметричних мітозів ненабагато поступалася частоті клітин з хромосомними абераціями. Частка клітин з комплексними порушеннями була найменшою, але достовірно більшою, ніж у контролі.

Таблиця 4

Спектр порушень мітозу в кореневій меристемі паростків пшениці та ячменю за дії токсинів гриба *Fusarium graminearum* Schwabe

Вид, сорт	Варіант досліджу	Частота клітин, %		
		з хромосомними аберациями	з асиметричним мітозом	з комплексними порушеннями
<i>Triticum aestivum</i> L. сорт Куяльник	Контроль n=250	2,8±1,0	0,4±0,4 ¹	0,4±0,4 ¹
	Інокулюм n=270	7,4±1,6*	5,2±1,4**	2,2±0,9
<i>Hordeum vulgare</i> L. сорт Росава	Контроль n=240	2,5±1,4	0,4±0,4 ¹	0,4±0,4 ¹
	Інокулюм n=252	9,9±1,9**	5,2±1,4**	2,4±1,0

Примітка: ¹ – показник розрахований з використанням поправки Ван-дер-Вардена

* – відмінності від контролю достовірні при P≤0,05

** – різниця з контролем достовірні при P≤0,01

Асиметрія поділу була зумовлена не лише нерівним розходженням хромосом, але й порушенням орієнтації веретена поділу. Пошкодження веретена поділу нерідко супроводжувалося й розщепленням полюсів поділу, що призводило в підсумку до багатополісного мітозу. Хоча частка асиметричних мітозів була меншою, ніж частка поділів з хромосомними аберациями, однак дана аномалія за дії інокулюма *F. graminearum* збільшилася у 13 разів. Ріст комплексних аномалій мітоза був менш суттєвий – майже в 6 разів. Таким чином, збільшення аномалій мітозу за дії інокулюма гриба відбулося переважно за рахунок пошкоджень веретена поділу.

Дослідження, проведене в 24 ізолятах *Fusarium graminearum*, зібраних зі злаків в культурі *in vitro* показало велику гетерогенність грибних популяцій – від активного продукування мікотоксинів до повної відсутності цього процесу [17]. В ізолятах, які продукували мікотоксини, було виявлено дезоксиніваленол (DON), діацетоксисцирпенол (DAS), фусаренон-X (FX), зеараленол (ZOL) і зеараленон (ZEA) [17].

Токсин DON викликає пошкодження мембран, про що свідчить вивільнення іонів Na і K у розчин [15]. D. Раска виявила за дії DON зменшення мітотичного індексу в кореневій меристемі жита, пшениці, тритикале і кінських бобів [23]. Хромосомні та ядерні аномалії включали спіралізацію метафазних хромосом та численні ана- та телофазні мости [23].

Токсин DAS [20] знижує життєздатність паростків та зменшує мітотичний індекс у жита і кінських бобів. Меншу чутливість до нього мають тритикале і пшениця. Дія DAS характеризується зміною тривалості фаз мітотичного поділу: суттєво збільшується кількість клітин на стадії метафази, збільшується і кількість аномалій метафазних хромосом (спіралізація, C-метафази, збільшення кількості хромосом, зірчасті хромосоми). Такі хромосомні аномалії вини-

кають внаслідок пошкоджень мітотичного веретена, викликаних порушенням синтезу білків, особливо білків мікротрубочок веретена [23].

Дослідження механізмів дії цитотоксичних ефектів DAS і DON на меристематичних клітинах *T. aestivum*, *S. cereale* та *V. faba* показало, що зазначені токсини збільшують співвідношення G_2/G_1 (частка ядер 4с збільшена) і зменшують мітотичний індекс. Надмірна конденсація профазних хромосом (у злаків) і мета- та анафазних хромосом (у *V. faba*) призводила до відповідних змін у фазових індексах. З'ясовано, що токсини DAS і DON можуть діяти і як інгібітори веретена поділу, перешкоджаючи нормальної течії мітозу. Наслідком дії DAS була зупинка клітинного циклу під час мітозу, в той час як дія DON здійснювала блокаду в фазі G_2 і запобігала початку мітозу [24].

З'ясовано, що ZEA має меншу фітотоксичність. Паростки жита, пшениці тритикале та кінських бобів різняться за своєю реакцією на дію ZEA. У жита мітотична активність збільшилася, а у пшениці та кінських бобів – зменшилася. При цьому не спостерігали жодних хромосомних аномалій [23]. Результати одночасного застосування DON і ZEA свідчать про їх адитивну і, можливо, синергічну дію [19].

Виявлені в інших дослідженнях чинники добре пояснюють переважання в представленій роботі ушкоджень, які стосуються саме мітотичного веретена. Що стосується показників мітотичного індексу, то ступінь його пригнічення був більший, ніж виявлений в роботі [7]. Можливими причинами цього є використання в представленій роботі інокулюма гриба, який містить суміш токсинів, здатних до адитивної дії [19], а не окремого мікотоксину. Крім того, не можна виключати генотипові особливості використаних злаків, а також і особливості використаної культури гриба.

Висновки

1. Метаболіти культуральної рідини *Fusarium graminearum* достовірно знижують енергію проростання і схожість насіння, а також мітотичний індекс кореневої меристеми м'якої пшениці та ячменю.

2. За впливу метаболітів інокулюма патогенного гриба достовірно збільшилась частка клітин з абераціями. Серед порушень спостерігали хромосомні аберації, відбитком яких було утворення мостів, фрагментів та відставань хромосом, а також асиметричний мітоз та комплексні порушення мітозу.

Стаття надійшла до редакції 17.01.2019

Список цитованої літератури

1. Бабаянц О. В. Основы селекции и методология оценок устойчивости пшеницы к возбудителям болезней / О. В. Бабаянц, Л. Т. Бабаянц. – Одесса: ВМВ, 2014. – 401 с.
2. Билай В. И. Фузариоз / В. И. Билай. – Киев: Наукова думка, 1977. – 444 с.

3. Волощук С. І. Індукована дією культуральних фільтратів патогенів *in vitro* цитологічна нестабільність як причина довготривалої соматональної мінливості у пшениці / С. І. Волощук, Г. Д. Волощук, В. С. Гірко // Вчимося господарювати: Матер. наук.-практ. семінару мол. вчених і спец. (Ч. II). 22-23 листопада 1999 р. – Київ – Чабани. – К.: Нора-Прінт, 1999. – С. 32-33.
4. Гостимский С. А. Практикум по цитогенетике / С. А. Гостимский, М. И. Дьякова, Е. В. Ивановская и др.. – М.: Изд-во МГУ, 1974. – 172 с.
5. Каталог сортів та гібридів Селекційно-генетичного інституту – Національного центру насіннєзнавства та сортовивчення / за ред. В. М. Соколова. – Одеса, 2016. – 172 с.
6. Насіння сільськогосподарських культур: Методи визначення якості : ДСТУ 4138-2002. – [Чинний від 2004-01-01]. – К.: Держстандарт України, 2003. – 173 с. – (Національні стандарти України).
7. Нежигай Л. М. Реакція мітотичного апарату сортів пшениці м'якої озимої на дію дезоксиніваленолу / Л. М. Нежигай, Т. М. Чеченева, Н. М. Куцоконь // Наук. доп. НУБіП України. – 2010. – № 6(22) – Електр. дан. – Реж. дост.: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/Nd/2010_6/10nlmsww.pdf
8. Паушева З. П. Практикум по цитологии растений / З. П. Паушева. – М.: Агропромиздат, 1988. – 271 с.
9. Рокицкий П. Ф. Биологическая статистика / П. Ф. Рокицкий. – Минск: Высшая школа, 1973. – 319 с.
10. Фузаріози культурних рослин: основи біології та шляхи контролювання / В. В. Швартай, О. А. Зозуля, Л. М. Михальська, О. Ю. Санін– К.: Логос, 2016. – 164 с.
11. Brown N. A. The infection biology of *Fusarium graminearum*: defining the pathways of spikelet to spikelet colonisation in wheat ears / N. A. Brown, M. Urban, A. M. van de Meene, K. E. Hammond-Kosack // Fungal Biol. – 2010. – Vol. 114, №7. – P. 555-571. doi: 10.1016/j.funbio.2010.04.006.
12. Brown N. A. Characterisation of the *Fusarium graminearum*-wheat floral interaction / N. A. Brown, C. Bass, T. K. Baldwin, H. Chen, F. Massot, P. W. Carion, M. Urban, A. M. van de Meene, K. E. Hammond-Kosack // J. Pathog. – 2011. – Vol. 2011. – Article ID 626345, 9 pages. doi: 10.4061/2011/626345.
13. Bushnell W. R. Histology and physiology of *Fusarium* head blight / W. R. Bushnell, B. E. Hazen, C. Pritsch. – In: Leonard K. J., Bushnell W.R., editors. *Fusarium* head blight of wheat and barley. – St. Paul: The American Phytopathological Society; 2003. – P. 44-83.
14. Catalogue of Gene Symbols for Wheat / R. A. McIntosh, J. Dubcovsky, W. J. Rogers, C. Morris, R. Appels, X. C. Xia, 2013. <https://maswheat.ucdavis.edu/CGSW/>
15. Cossette F. Phytotoxic effect of deoxynivalenol and gibberella ear rot resistance of corn / F. Cossette, J. D. Miller // Nat. Toxins. – 1995. – Vol. 3. – P. 383-388.
16. Desjardins A. E. Mycotoxins in plant pathogenesis / A. E. Desjardins, T. M. Hohn // Mol. Plant Microbe Interact. – 1997. – Vol. 10, № 2. – P. 147-152. doi: 10.1094/MPMI.1997.10.2.147.
17. Geraldo M. R. F. Production of mycotoxins by *Fusarium graminearum* isolated from small cereals (wheat, triticale and barley) affected with scab disease in Southern Brazil / M. R. F. Geraldo, D. J. Tessmann, C. Kemmelmeier // Braz. J. Microbiol. – 2006. – Vol. 37, № 1. – P. 58-63.
18. Kazan K. On the trail of a cereal killer: recent advances in *Fusarium graminearum* pathogenomics and host resistance / K. Kazan, D. M. Gardiner, J. M. Manners // Mol Plant Pathol. – 2012. – Vol. 13, № 4. – P. 399-413. doi: 10.1111/j.1364-3703.2011.00762.x.
19. McLean M. The phytotoxicity of selected mycotoxins on mature, germinating *Zea mays* embryos / M. McLean // Mycopathologia. – 1995. – Vol. 132, №3. – P. 173-183.
20. McLean M. The phytotoxicity of *Fusarium* metabolites: An update since 1989 / M. McLean // Mycopathologia. – 1996. – Vol. 133, № 3. – P. 163-179.
21. McMullen M. Scab of wheat and barley: a re-emerging disease of devastating impact / M. McMullen, R. Jones, D. Gallenberg // Plant Dis. – 1997. – Vol. 81, № 12. – P. 1340-1348. doi: 10.1094/PDIS.1997.81.12.1340.
22. Mesterházy A. Types and components of resistance to *Fusarium* head blight of wheat / A. Mesterházy // Plant Breed. – 1995. – Vol. 114, № 5. – P. 377-386. doi: 10.1111/j.1439-0523.1995.tb00816.x.
23. Packa D. Cytogenetic changes in plant cells as influenced by mycotoxins / D. Packa // Mycotox. Res. – 1991. – Vol. 7, Suppl. 2. – P. 150-155.
24. Packa D. Trichothecene fusarial toxins perturb the cell cycle in meristematic cells of *Secale cereale* L., *Triticum aestivum* L. and *Vicia faba* L. / D. Packa, E. Sliwinska // Caryologia. – 2005. – Vol. 58, № 1. – P. 86-93.
25. Skadsen R.W. Use of *Fusarium graminearum* transformed with gfp to follow infection patterns in barley and Arabidopsis / R. W. Skadsen, T. M. Hohn // Physiol. Mol. Plant Path. – 2004. – Vol. 64, № 1. – P. 45-53. doi: 10.1016/j.pmpp.2004.04.003.
26. Walter S. Action and reaction of host and pathogen during *Fusarium* head blight disease / S. Walter, P. Nicholson, F. M. Doohan // New Phytol. – 2010. – Vol. 185, № 1. – P. 54-66. doi: 10.1111/j.1469-8137.2009.03041.x.
27. Wiśniewska H. Influence of deoxynivalenol on mitosis of root tip cells of wheat seedlings / H. Wiśniewska, J. Chelkowski // Acta Physiol. Plantarum. – 1994. – Vol. 16, № 3. – P. 159-162.

А. Л. Сечняк, С. Л. Мирось, Е. А. Довганюк

Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова,
кафедра генетики та молекулярной биологии,
ул. Дворянская, 2, Одесса, 65082, Украина,
e-mail: a.sechnyak@onu.edu.ua,

ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ *FUSARIUM GRAMINEARUM* SCHWABE НА ЗЛАКОВЫЕ КУЛЬТУРЫ

Резюме

Проблема. В Украине фузариоз зерновых культур проявляется масштабно и стабильно. Микотоксинам фузариума свойственна не только общая токсичность, но цитогенетическая генотоксичность.

Целью работы является оценка цитогенетической генотоксичности инокулюма *Fusarium graminearum* Schwabe.

Материалы и методы. Использовали мягкую пшеницу Куяльник, ячмень Росава, штамм К-90 *F. graminearum*. Энергию прорастания и всхожесть семян определяли по стандарту, генотоксичность – анафазным тестом.

Основные результаты исследования. Воздействие инокулюма достоверно снижало энергию прорастания и, в меньшей мере, всхожесть семян пшеницы и ячменя, а также приводило к снижению митотического индекса в корневой меристеме проростков. У ячменя митозы подавлялись сильнее, чем у пшеницы. Достоверно возросла доля клеток с нарушениями митоза, у ячменя в большей мере, чем у пшеницы. Наблюдали хромосомные aberrации (мосты, фрагменты), асимметричный митоз и комплексные нарушения (в одной клетке несколько типов нарушений). Частота хромосомных aberrаций у пшеницы возросла в 2,6 раза по сравнению с контролем, а у ячменя – в 4 раза. Асимметрия обусловлена неравным расхождением хромосом и нарушением ориентации веретена деления. Повреждение веретена нередко сочеталось с расщеплением полюсов деления, что приводило к многополюсному митозу. Доля асимметричных митозов в результате воздействия инокулюма возросла в 13 раз.

Выводы. Метаболиты инокулюма *Fusarium graminearum* достоверно снижают энергию прорастания и всхожесть семян, митотический индекс корневой меристемы мягкой пшеницы и ячменя. При этом достоверно возросла доля клеток с хромосомными aberrациями, асимметричным митозом и комплексными нарушениями митоза.

Ключевые слова: *Fusarium graminearum*, пшеница мягкая, ячмень, митотический индекс, анафазный тест, нарушения митоза

A. L. Sechniak, S. L. Miros, E. A. Dovganiuk

Odesa Mechnykov National University, Department of Genetics
and Molecular Biology,

2, Dvoryanska str, Odesa, 65082, Ukraine, e-mail: a.sechnyak@onu.edu.ua

CYTOGENETIC EFFECTS OF FUSARIUM GRAMINEARUM SCHWABE ON CEREAL CULTURES

Abstract

Problem. Fusarium wilt of cereals is manifested on a large scale and in a stable way in Ukraine. Fusarium mycotoxins are characterized not only by general toxicity but by cytogenetic genotoxicity.

The aim of the work is to assess the cytogenetic genotoxicity of the *Fusarium graminearum* Schwabe inoculum.

Materials and methods. Bread wheat Kuyalnik, barley Rosava, strain K-90 of *F. graminearum* were used. The vigour and germination of seeds were determined by the standard, genotoxicity – by anaphase test.

The main results of the study. The impact of the inoculum significantly reduced the vigour and to a lesser extent the seeds germination of wheat and barley as well as reduced mitotic index in the root meristem of seedlings. The barley mitoses were suppressed more strongly than in wheat. The proportion of cells with impaired mitosis significantly increased in barley more than in wheat. Chromosomal aberrations (bridges, fragments), asymmetric mitosis, and complex disorders (several types of disorders in one cell) were observed. The frequency of chromosomal aberrations in wheat increased by 2.6 times compared with the control, and in barley – by 4 times. The asymmetry was due to unequal chromosome separation and a disorder in the orientation of the spindle. The spindle damage was often combined with splitting of the division poles, which led to multipolar mitosis. There was a 13-fold increase in proportion of asymmetric mitoses resulting from the exposure to the inoculum.

Conclusion. The inoculum metabolites of *Fusarium graminearum* significantly reduce the germination energy and seed germination, the mitotic index of the bread wheat and barley meristem. At the same time, the proportion of cells with chromosomal aberrations, asymmetric mitosis and complex mitosis disorders significantly increased.

Key words: *Fusarium graminearum*; bread wheat; barley; mitotic index; anaphase test; mitosis disorders

References

1. Babayants O. V., Babayants L. T. (2014) *Basics of selection and methodology of wheat resistance estimates for pathogens of diseases* [Osnovy selektsii i metodologiya otzenok ustoychivosti pshenitzy k vzbuditelyam bolezney], Odessa, WMW, 401 p.
2. Bilay V. I. (1977) *Fusaria* [Fusii], Kiev, Naukova Dumka, 444 p.
3. Voloshchuk S. I., Voloshchuk G. D., Girko V.S. (1999) Induced by the action of culture filtrate pathogens in vitro, cytological instability as a cause of long-term somaclonal variability in wheat [Indukovana dieyu kul'tural'nykh fil'trativ patogeniv in vitro tzitologichna nestabil'nist' yak prychyna dovgotryvaloi somaklo9nal'noi minlyvosti u pshenitzy] // *Vchymosya gospodoryuvatu: Mater. sci. pract. workshop scientists and specialist (Ch. II). November 22-23, 1999, Kyiv – Chabany*, Kyiv, Nora Print, 32-33.

4. Gostemskii S. A., Dyakova M. I., Ivanovskaya E. V. et al. (1974) *Workshop on cytogenetics* [Praktikum po tztogenetike], Moscow, MGU 172 p.
5. *Catalog of varieties and hybrids of the Selection-Genetic Institute – National Center for Seed and Varieties Studies* (2016) [Selekciyno-genetichnyi institut – nacional'niy centr nasinnieznavstva ta sortovivchennya], ed. V. M. Sokolov, Odessa, 172 p.
6. *Seeds of agricultural crops: Methods of determining quality: DSTU 4138-2002*, [Effective from 01/01/2004], Kiev, Gosstandart of Ukraine, 173 p. (National standards of Ukraine).
7. Nezhigay L. M., Chechenieva T. M., Kutsokon' N. M. (2010) The reaction of the mitotic apparatus of soft winter wheat varieties on the action of deoxynivalenol [Reaktsiya mitotichnogo aparatu sortiv pshenitzy myakoi ozymoi na diyu desokinivalenolu], *Nauk. Dop. NUBiP Ukrainy*, 6(22), http://www.nbuv.gov.ua/e-journals/Nd/2010_6/10nlmsww.pdf
8. Pausheva Z. P. (1988) *Workshop on plant cytology* [Praktikum po tztologii rasteniy], Moscow, Agropromizdat, 271 p.
9. Rokitsky P. F. (1973) *Biological statistics* [Biologicheskaya statistika], Minsk, Vysheishaya shkola, 319 p.
10. Shvartau V. V., Zozulya O. A., Mikhalskaya L. M., Sanin O. Yu. (2016) *Fusariosis of Cultivated Plants: Fundamentals of Biology and Methods of Control* [Fusariosy kulturnykh roslyn: osnovy biologii nf shlyakhy kontrolyuvannya], Kiev, Logos, 164 p.
11. Brown N.A., Urban M., van de Meene A. M., Hammond-Kosack K. E. (2010) The infection biology of *Fusarium graminearum*: defining the pathways of spikelet to spikelet colonisation in wheat ears, *Fungal Biol*, 114, 7, pp. 555-571. doi: 10.1016/j.funbio.2010.04.006.
12. Brown N. A., Bass C., Baldwin T.K., Chen H., Massot F., Carion P.W., Urban M., van de Meene A. M., Hammond-Kosack K. E. (2011) Characterisation of the *Fusarium graminearum*-wheat floral interaction, *J. Pathog*, 2011. Article ID 626345, 9 pages. doi: 10.4061/2011/626345.
13. Bushnell W. R., Hazen B. E., Pritsch C (2003). Histology and physiology of *Fusarium* head blight, *Fusarium* head blight of wheat and barley, St. Paul: The American Phytopathological Society, p. 44-83.
14. Catalogue of Gene Symbols for Wheat, R. A. McIntosh, J. Dubcovsky, W. J. Rogers, C. Morris, R. Appels, X. C. Xia, (2013) <https://maswheat.ucdavis.edu/CGSW/>
15. Cossette F., Miller J. D. (1995) Phytotoxic effect of deoxynivalenol and gibberella ear rot resistance of corn, *Nat. Toxins*, 3, pp. 383-388.
16. Desjardins A. E., Hohn T. M. Mycotoxins in plant pathogenesis (1997) *Mol. Plant Microbe Interact*, 10, 2, pp. 147–152. doi: 10.1094/MPML.1997.10.2.147.
17. Geraldo M. R. F., Tessmann D. J., Kemmelmeier C. (2006) Production of mycotoxins by *Fusarium graminearum* isolated from small cereals (wheat, triticale and barley) affected with scab disease in Southern Brazil, *Braz. J. Microbiol*, 37, 1, pp. 58-63.
18. Kazan K., Gardiner D. M., Manners J. M. (2012) On the trail of a cereal killer: recent advances in *Fusarium graminearum* pathogenomics and host resistance, *Mol Plant Pathol*, 13, 4, pp. 399-413. doi: 10.1111/j.1364-3703.2011.00762.x.
19. McLean M. (1995) The phytotoxicity of selected mycotoxins on mature, germinating *Zea mays* embryos, *Mycopathologia*, 132, 3, pp. 173–183.
20. McLean M. (1996) The phytotoxicity of *Fusarium* metabolites: An update since 1989, *Mycopathologia*, 133, 3, pp. 163-179.
21. McMullen M., Jones R., Gallenberg D. (1997) Scab of wheat and barley: a re-emerging disease of devastating impact, *Plant Dis*, 81, 12, pp. 1340–1348. doi: 10.1094/PDIS.1997.81.12.1340.
22. Mesterházy A. (1995) Types and components of resistance to *Fusarium* head blight of wheat, *Plant Breed*, 114, 5, pp. 377-386. doi: 10.1111/j.1439-0523.1995.tb00816.x.
23. Packa D. (1991) Cytogenetic changes in plant cells as influenced by mycotoxins, *Mycotox. Res.*, 7, 2, pp. 150-155.
24. Packa D., Sliwinska E. (2005) Trichothecene fusarial toxins perturb the cell cycle in meristematic cells of *Secale cereale* L., *Triticum aestivum* L. and *Vicia faba* L., *Caryologia*, 58, 1, pp. 86-93.
25. Skadsen R. W., Hohn T. M. (2004) Use of *Fusarium graminearum* transformed with gfp to follow infection patterns in barley and Arabidopsis, *Physiol. Mol. Plant Pathol.*, 64, 1, pp. 45–53. doi: 10.1016/j.pmpp.2004.04.003.
26. Walter S., Nicholson P., Doohan F. M. (2010) Action and reaction of host and pathogen during *Fusarium* head blight disease, *New Phytol.*, 185, 1, pp. 54-66. doi: 10.1111/j.1469-8137.2009.03041.x.
27. Wiśniewska H., Chelkowski J. (1994) Influence of deoxynivalenol on mitosis of root tip cells of wheat seedlings, *Acta Physiol. Plantarum*, 16, 3, pp. 159-162.