

19. Гуцол Г.В., Мазур О.В. Вирощування олійних культур та інтенсивність накопичення важких металів у ґрунтах за їх мінерального удобрення в умовах Вінниччини. *Сільське господарство та лісівництво*. 2021. № 3 (22). С. 217–226.

20. Tkachuk O.P., Didur I.M., Mazur O.V. Technological and agro-ecological indicators of groups of soybean varieties by maturity. *Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва*. 2023. Ч. 1. Вип. 102. С. 54–63.

21. Tkachuk O.P., Didur I.M., Mazur O.V. Cultivation of early soybean varieties in the context of intensive agriculture and climate change. *Аграрні інновації*. 2023. № 18. С. 128–135.

22. Tkachuk O.P., Didur I.M., Mazur O.V. Adaptability and agroecological sustainability of fast ripening soybean varieties. *Наукові доповіді НУБіП*. 2023. № 1 (101). DOI: [https://doi.org/10.31548/dopovid1\(101\).2023.003](https://doi.org/10.31548/dopovid1(101).2023.003)

23. Tkachuk O.P., Didur I.M., Mazur O.V. Adaptability, sustainability and productivity of mid-early soybean varieties. *Аграрні інновації*. 2022. № 16. С. 70–79.

УДК 633.11:631.95:575.21

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.132.6>

ДЕПРЕСІЯ ВИХІДНОГО МАТЕРІАЛУ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД СОРТУ ТА ТИПУ ЧИННИКА

Діденко В.В. – аспірант кафедри селекції і насінництва,

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

Назаренко М.М. – д.с.-г.н.,

професор кафедри селекції і насінництва,

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

Застосування мутагенних чинників для генетичного поліпшення дозволяє в короткі терміни отримати суттєві позитивні зміни, але проблемою залишається наявність сильної депресії в першому поколінні. Метою дослідження було виявити наслідки дії мутагенів з високою ушкоджувальною здатністю на показники мутантної популяції в першому поколінні для встановлення оптимальних параметрів протоколу застосування для генетичного поліпшення пшениці озимої. Насіння двох сортів пшениці озимої Вежа та Ігреста обробляли водним розчином хімічних мутагенів азиду натрію у концентраціях 0,01 %, 0,025 %, 0,05 %, 0,1 % та етилметансульфонату (тут та далі ЕМС) у концентраціях 0,025 %, 0,05 %, 0,1 %. Для кожної обробки були використані 1000 зерен пшениці озимої. Експозиція дії мутагену становила 24 години. оцінювали схожість, виживання, фертильність, ознаки структури врожайності. Сорт Вежа виявився значно більш стійким до депресивних впливів у першому поколінні, ніж сорт Ігреста. В усіх випадках для усіх сортів фертильність статистично значимо знижувалася за дії усіх концентрацій та в порівнянні з контролем. Азид натрію виявляв свою дію набагато сильніше в аналогічних концентраціях, ніж ЕМС. Діапазон застосованих концентрацій досяг напівлетальних значень, Вплив генотипу був достовірним, як і підвищення концентрації. За результатами дискримінантного аналізу високочисливими були схожість, виживання, фертильність, вага зерна з головного колосу та з рослини, МТЗ, що достовірно відтворювали мутагенну депресію. Як мутаген азид натрію в дії призводить до суттєвого підвищення депресії в першому поколінні в порівнянні з етилметансульфонатом, а сорт Ігреста суттєво поступається за стійкістю до обох чинників в порівнянні з сортом Вежа, що швидше за все обумовлено генетично. Різниця між сортами не завжди достовірна при дії нижчих доз та суттєво зростає при її підвищенні. Застосування 0,1 % концентрації ЕМС та 0,05–0,1 % концентрації азиду натрію суттєво підвищують пряму та віддалену загибель

мутантної популяції. Більш оптимальними за рівнем зниження показників є застосування EMS у концентраціях 0,025 % та 0,05 % та азиду натрію у концентраціях 0,01 % та 0,025 %. Високу мінливість мають ознаки схожості, виживання, фертильність, вага зерна з головного колосу та з рослини, МТЗ, котрі можна вважати як ті, що достовірно показують рівень впливу чинників.

Ключові слова: пшениця озима, азид натрію, етилметансульфонат, мутагенна депресія, сорт.

Didenko V.V., Nazarenko M.M. Depression of the winter wheat initial material depending on the variety and type of factor

The use of mutagenic factors for genetic improvement makes it possible to obtain significant positive changes in a short time, but the presence of severe depression in the first generation remains a problem. The aim of the study was to reveal the effects of highly damaging mutagens on the parameters of the mutant population in the first generation in order to establish the optimal parameters of the application protocol for the genetic improvement of winter wheat. The seeds of two varieties of winter wheat, *Vezha* and *Igrysta*, were treated with an aqueous solution of the chemical mutagens sodium azide in concentrations of 0.01 %, 0.025 %, 0.05 %, 0.1 % and ethylmethanesulfonate (hereinafter EMS) in concentrations of 0.025 %, 0.05 %, 0.1 %. 1000 grains of winter wheat were used for each treatment. Exposure to the mutagen was 24 hours. Similarity, survival, fertility, signs of yield structure were evaluated. The variety *Vezha* was much more resistant to depressive effects in the first generation than the variety *Igrysta*. In all cases, for all varieties, fertility was statistically significantly reduced under the influence of all concentrations and in comparison, with the control. Sodium azide showed its effect much stronger in similar concentrations than EMS. The range of applied concentrations reached semi-lethal values. The effect of genotype was reliable, as was the increase in concentration. According to the results of the discriminant analysis, germination, survival, fertility, grain weight from the main ear and from the plant, TGW, which reliably reproduced mutagenic depression, were highly variable. As a mutagen, sodium azide in action leads to a significant increase in depression in the first generation compared to ethylmethanesulfonate, and the variety *Igrysta* is significantly inferior in resistance to both factors compared to the variety *Vezha*, which is most likely due to genetics. The difference between varieties is not always reliable at lower doses and significantly increases at higher doses. The use of 0.1 % concentration of EMS and 0.05–0.1 % concentration of sodium azide significantly increases the direct and remote death of the mutant population. The use of EMS in concentrations of 0.025 % and 0.05 % and sodium azide in concentrations of 0.01 % and 0.025 % are more optimal in terms of reducing indicators. The traits of germination, survival, fertility, grain weight from the main ear and from the plant, TGW, which can be considered as those that reliably show the level of influence of factors, have high variability.

Key words: winter wheat, sodium azide, ethylmethanesulfonate, mutagen depression, variety.

Постановка проблеми. Застосування мутагенних чинників, особливо хімічних, для генетичного поліпшення рослин дозволяє в короткі терміни отримати суттєві позитивні зміни та створити матеріал з якісно-новими ознаками [2]. Проблемою залишається наявність доволі сильної депресії в першому поколінні, котра призводить до загибелі та неповноцінності рослин мутантної популяції [1; 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мутагенна депресія як явище післядії генетично-активного чинника в першому поколінні суттєво обмежує вибірку матеріала для подальшого дослідження частоти та спектру спадкових змін [6; 7].

В цілому хімічні супермутагени як генетично-активні агенти характеризуються нижчою ушкоджувальною здатністю, але підвищення концентрації призводить до суттєвого зростання не тільки цінних полігенних мутацій, але й несприятливих наслідків [4; 5].

Застосування антимуутагенних речовин для зниження депресивних наслідків призводить також й до суттєвого зниження виходу цінних зразків. Що є недоцільним з огляду на мету застосування генетично-активних речовин [8; 9].

Одним з шляхів зниження депресивних ефектів є використання вихідних форм з генетично-обумовленими механізмами стійкості до мутагенної дії, доволі часто такий вихідний матеріал характеризується суттєво вищим виходом цінних властивостей [10].

Метою було виявити наслідки дії мутагенів з високою ушкоджувальною здатністю на показники мутантної популяції в першому поколінні для встановлення оптимальних параметрів протоколу застосування для генетичного поліпшення пшениці озимої.

Постановка завдання. Насіння двох сортів пшениці озимої Вежа та Ігрита обробляли водним розчином хімічних мутагенів азиду натрію у концентраціях 0,01 %, 0,025 %, 0,05 %, 0,1 % та етилметансульфонату (тут та далі ЕМС) у концентраціях 0,025 %, 0,05 %, 0,1 %. Для кожної обробки були використані 1000 зерен пшениці озимої. Експозиція дії мутагену становила 24 години. Для контролю використовували необроблені вихідні форми (зерна сортів, замочені у воді).

У першому поколінні мутантів сортів, що отримали мутагенну дію була проведена оцінка таких онтогенетичних показників як схожість, виживання після періоду перезимівлі, фертильність, ознаки структури врожайності. Посів проводили вручну, із нормою 1000 життєздатних насінин в рядок (довжина 1,5 м), міжряддя 15 см, ділянка 10 рядків, контроль на початку для кожного сорту. Стерильність пилку визначали світловим мікроскопуванням пофарбованих ацетокарміном зразків (20–25 препаратів). Проводили структурний аналіз 25–30 рослин.

Досліди проводили на дослідному полі Дніпровського державного аграрно-економічного університету (с. Олександрівка, Дніпровський район, Дніпропетровська область, Україна). Математичну обробку результатів проводили факторним аналізом за допомогою модуля ANOVA, ідентифікацію модельних параметрів мутагенної депресії здійснювали дискримінантним аналізом. У всіх випадках використовували стандартні засоби програми Statistica 10.0.

Виклад основного матеріалу дослідження. Всього було висіяно 16 варіантів, дані щодо онтогенетичних параметрів рослин пшениці озимої для мутантної популяції в першому поколінні наведені в таблиці 1.

На контролі у сорту Ігрита схожість становила 97,3 %, що є добрим показником для цього сорту. Під впливом ЕМС схожість знизилася наступним чином: ЕМС 0,025 % – 89,0 %, 0,05 % – 77,0 % і 0,1 % 64,0 %. Вища концентрація ЕМС за своїм ефектом у зменшенні схожості наближалася до напівлетальної, схожість зменшувалася зі статистичною значущістю з кожною вищою градацією концентрації ($F = 19,62$; $F_{0,05} = 2,88$; $P = 0,001$).

За дії азиду натрію в концентраціях 0,01 %, 0,025 %, 0,05 % і 0,1 % схожість становила відповідно 87,3 %, 75,0 %, 63,3 % і 55,3 %. Азид натрію як мутаген виявляв значно більш виражену депресивну дію; екстремальна доза цього фактору виявилася напівлетальною для сорту Ігрита. Спостерігалось статистично достовірне зниження схожості озимої пшениці з кожним збільшенням концентрації азиду натрію ($F = 17,36$; $F_{0,05} = 3,16$; $P = 0,001$).

У контролі сорту Вежа схожість становила 97,7 %. Під впливом ЕМС схожість знизилася наступним чином: ЕМС 0,025 % – 90,0 %, 0,05 % – 80,7 % і 0,1 % – 70,3 %. Вища концентрація ЕМС за своїм впливом на зменшення схожості сильно відрізнялася від аналогічної для попереднього сорту, генотип більш стійкий до дії ЕМС, схожість знижувалася зі статистично значущою вагою з кожною вищою градацією концентрації ($F = 20,32$; $F_{0,05} = 2,88$; $P = 0,0001$). Мутагенна депресія у цього сорту була менш виражена, ніж у сорту Ігрита, що може бути пов'язано з меншою чутливістю генотипу, оскільки обидва сорти мають високу адаптивність до умов регіону.

Таблиця 1
Схожість та виживання першого покоління пшениці озимої,
що отримала мутагенну дію

Варіант	Схожість		Виживання	
	шт.	%	шт.	%
Вежа, контроль	977	97,67 ± 1,13	971	97,1 ± 0,5 ^a
Вежа, ЕМС 0,025 %	900	90,00 ± 1,31	857	85,7 ± 1,1 ^b
Вежа, ЕМС 0,05 %	807	80,67 ± 2,12	745	74,5 ± 1,2 ^c
Вежа, ЕМС 0,1 %	700	70,33 ± 2,11	652	65,2 ± 1,2 ^d
Вежа, азид натрію 0,01 %	870	87,00 ± 1,33	834	83,4 ± 1,3 ^b
Вежа, азид натрію 0,025 %	777	77,67 ± 2,17	746	74,6 ± 1,5 ^c
Вежа, азид натрію 0,05 %	707	70,67 ± 1,03	643	64,3 ± 1,3 ^d
Вежа, азид натрію 0,1 %	613	61,33 ± 2,02	556	55,6 ± 1,2 ^c
Ігрита, контроль	973	97,3 ± 1,15	942	94,2 ± 1,0 ^a
Ігрита, ЕМС 0,025 %	890	89,00 ± 2,61	867	86,7 ± 1,1 ^b
Ігрита, ЕМС 0,05 %	770	77,00 ± 1,53	743	74,3 ± 1,2 ^c
Ігрита, ЕМС 0,1 %	640	64,00 ± 2,15	589	58,9 ± 1,2 ^d
Ігрита, азид натрію 0,01 %	873	87,30 ± 2,18	834	83,4 ± 1,3 ^b
Ігрита, азид натрію 0,025 %	750	75,00 ± 2,34	703	70,3 ± 1,3 ^c
Ігрита, азид натрію 0,05 %	633	63,30 ± 1,14	596	59,6 ± 1,5 ^d
Ігрита, азид натрію 0,1 %	553	55,30 ± 1,45	489	48,9 ± 1,3 ^c

Примітка: різниця статистично достовірна за факторним аналізом ANOVA за концентраціями при $P_{0,05}$

За дії азиду натрію в концентраціях 0,01 %, 0,025 %, 0,05 % і 0,1 % схожість становила відповідно 87,0 %, 77,7 %, 70,7 % і 61,3 %. Азид натрію як мутаген і для цього сорту виявляв значно більш виражену депресивну дію; вища доза цього фактору виявилася ближчою до напівлетальної й для сорту Вежа. Спостерігалось статистично достовірне зниження схожості озимої пшениці з кожним збільшенням концентрації азиду натрію ($F = 23,14$; $F_{0,05} = 3,16$; $P = 0,0001$). Мутагенна депресія знову була значною величиною для цього сорту, але у випадку азиду натрію депресія була значно вищою.

Таким чином, сорт Вежа виявився значно більш стійким до депресивних впливів у першому поколінні, ніж сорт Ігрита. У свою чергу, як мутаген, азид натрію виявляв свою дію набагато сильніше в аналогічних концентраціях, ніж ЕМС. Діапазон застосованих концентрацій досяг практично напівлетальних значень, що дає можливість розраховувати на контрастність отриманого матеріалу з генетичної точки зору при вивченні спектру та частоти спадкових змін у майбутньому. У результаті факторного аналізу встановлено, що вплив генотипу (сорту) є достовірним ($F = 10,5$; $F_{0,05} = 5,59$; $P = 0,01$), як і підвищення концентрації мутагенів ($F = 80,90$; $F_{0,05} = 3,78$; $P < 0,01$) у всіх випадках.

Слід зазначити, що проходження фенофаз у матеріалу, обробленого мутагенами при дії найвищої концентрації затримувалось на 5–7 днів в порівнянні з контролем, що є значимим. Відповідно агенти слід віднести до високоактивних.

Дані аналізу стерильності пилку пшениці озимої представлені в таблицях 2–3. Цей показник суттєво відтворює підвищення концентрації мутагену ($F = 114,17$; $F_{0,05} = 3,11$; $P < 0,01$) та зміни по генотипу між двома сортами ($F = 14,19$; $F_{0,05} = 5,17$; $P = 0,01$).

В усіх випадках для усіх сортів фертильність статистично значимо знижувалася за дії усіх концентрацій та в порівнянні з контролем. Генотипова мінливість була достовірною при дії вищих концентрацій ($F = 14,44$; $F_{0,05} = 5,17$; $P = 0,003$).

Таблиця 2

Стерильність пилку у першого покоління пшениці озимої за дії ЕМС

Сорт	Контроль	ЕМС 0,025 %	ЕМС 0,05 %	ЕМС 0,1 %
Вежа	98,1 ± 0,7 ^a	88,2 ± 1,1 ^b	78,5 ± 1,0 ^c	71,0 ± 1,3 ^d
Ігрита	98,8 ± 0,6 ^a	86,1 ± 1,1 ^b	76,1 ± 0,9 ^c	67,2 ± 1,2 ^d

Примітка: різниця статистично достовірна за факторним аналізом ANOVA за концентраціями при $P_{0,05}$

Таблиця 3

Стерильність пилку у першого покоління пшениці озимої за дії азиду натрію

Сорт	Контроль	Азид натрію 0,01 %	Азид натрію 0,025 %	Азид натрію 0,05 %	Азид натрію 0,1 %
Вежа	98,1 ± 0,7 ^a	89,7 ± 1,0 ^b	82,2 ± 1,1 ^c	73,0 ± 1,1 ^d	66,3 ± 1,1 ^e
Ігрита	98,8 ± 0,6 ^a	86,5 ± 1,2 ^b	79,9 ± 0,7 ^c	68,2 ± 1,1 ^d	60,3 ± 1,2 ^e

Примітка: різниця статистично достовірна за факторним аналізом ANOVA за концентраціями при $P_{0,05}$

В таблиці 4 наведені дані щодо особливостей прояву впливу мутагену на елементи структури врожайності. Проводився аналіз за 9 ознаками, але загальна та продуктивна куцистість, довжина, кількість колосків головного колосу не наведені, оскільки варіативність спостерігалася значимо лише при дії четвертої та, не завжди третьої концентрації азиду натрію, та третьої концентрації ЕМС.

Представлено дані тільки за тими ознаками, що проявляли високу або мінімум посередню мінливість, тобто параметри висоти, кількості зерна та його ваги з головного колосу, озерненість рослини та маса тисячі зерен. Аналіз даних показав, що за першою ознакою статистично достовірно відрізняється депресія усіх варіантів за концентраціями одне від одного в рамках сорту та мутагену та від контролю. В усіх випадках чітко ідентифікується дія азиду натрію ($F = 69,92$; $F_{0,05} = 2,89$; $P < 0,01$) та ЕМС ($F = 41,17$; $F_{0,05} = 3,21$; $P < 0,01$). Різниця між генотипами є не для всіх концентрацій, але в цілому значима також ($F = 9,07$; $F_{0,05} = 4,14$; $P = 0,01$).

Озерненість головного колосу не відноситься до високоваріативних ознак, але все ж таки різниця для генотипів ($F = 6,90$; $F_{0,05} = 4,14$; $P = 0,03$) та зростання концентрацій ($F = 7,89$; $F_{0,05} = 2,89$; $P = 0,03$) статистично достовірна. Для генотипів спостерігалася наявність двох груп, достовірна відмінність спостерігалася лише при дії 0,05-0,1 % концентрацій у азиду натрію та 0,1 % у ЕМС.

Параметри вага зерно з головного колосу та вага зерна з рослини мають високу варіативність в залежності від активності мутагенів. Кожна концентрація відрізнялась одна від одної та від контролю. Різниця для сортів ($F = 7,92$; $F_{0,05} = 4,14$; $P = 0,01$) та зростання концентрацій ($F = 66,22$; $F_{0,05} = 2,89$; $P < 0,01$) статистично достовірна.

МТЗ був самою чутливою до зростання активності мутагену ознакою. Різниця для сортів ($F = 8,90$; $F_{0,05} = 4,14$; $P = 0,02$) та різних концентрацій ($F = 167,42$; $F_{0,05} = 2,89$; $P < 0,01$) знов статистично достовірна.

Таблиця 4

Елементи структури врожайності. Прояв мутагенної депресії

Варіант	Висота, см.	Кількість зерен, шт.	Вага зерна, г.		МТЗ, г.
			з колосу	з рослини	
Вежа, контроль	99,8 ^a	32,0 ^a	1,25 ^a	3,78 ^a	41,3 ^a
Вежа, ЕМС 0,025 %	92,2 ^b	32,0 ^a	1,10 ^b	3,37 ^b	38,1 ^b
Вежа, ЕМС 0,05 %	85,5 ^c	30,0 ^a	1,00 ^c	3,01 ^c	34,5 ^c
Вежа, ЕМС 0,1 %	79,5 ^d	24,0 ^b	0,88 ^d	2,11 ^d	29,9 ^d
Вежа, азид натрію 0,01 %	93,1 ^b	32,0 ^a	1,11 ^b	3,21 ^b	37,8 ^b
Вежа, азид натрію 0,025 %	86,2 ^c	30,0 ^a	0,97 ^c	2,80 ^c	33,2 ^c
Вежа, азид натрію 0,05 %	78,1 ^d	24,0 ^b	0,81 ^d	2,22 ^d	28,0 ^d
Вежа, азид натрію 0,1 %	74,1 ^e	18,0 ^c	0,69 ^e	1,51 ^e	23,1 ^e
Ігрита, контроль	82,1 ^a	34,0 ^a	1,29 ^a	3,45 ^a	42,3 ^a
Ігрита, ЕМС 0,025 %	79,1 ^b	32,0 ^a	1,13 ^b	3,11 ^b	39,1 ^b
Ігрита, ЕМС 0,05 %	73,2 ^c	31,0 ^a	1,00 ^c	2,88 ^c	34,0 ^c
Ігрита, ЕМС 0,1 %	68,0 ^d	23,0 ^b	0,86 ^d	2,01 ^d	28,0 ^d
Ігрита, азид натрію 0,01 %	79,5 ^b	33,0 ^a	1,11 ^b	3,10 ^b	38,7 ^b
Ігрита, азид натрію 0,025 %	71,9 ^c	32,0 ^a	0,99 ^c	3,01 ^c	34,2 ^c
Ігрита, азид натрію 0,05 %	67,0 ^d	26,0 ^b	0,81 ^d	2,33 ^d	29,1 ^d
Ігрита, азид натрію 0,1 %	63,1 ^e	25,0 ^b	0,60 ^e	1,31 ^e	21,0 ^e

Примітка: різниця статистично достовірна за факторним аналізом ANOVA за концентраціями при $P_{0,05}$

Для класифікації та підтвердження параметрів мінливості по кожній ознаці був проведений дискримінантний аналіз (таблиця 4).

Таблиця 5

Результати дискримінантного аналізу за даними онтогенезу пшениці озимої в першому поколінні

Змінні в моделі	Коефіцієнт Уїлкса λ	F-remove (4,19)	p-level
Схожість, шт.	0,49	23,17	<0,01
Вживання, шт.	0,65	27,44	<0,01
Фертильність, %	0,67	27,14	<0,01
Висота, см	0,51	19,02	<0,01
Загальна кущистість	0,03	1,10	0,17
Продуктивна кущистість	0,03	1,10	0,17
Довжина головного колосу, см	0,03	1,12	0,17
Кількість колосків, шт.	0,01	0,53	0,22
Зерна з головного колосу, шт.	0,09	2,02	0,12
Вага зерна з головного колосу, гр.	0,37	15,37	<0,01
Вага зерна з рослини, гр.	0,38	15,39	<0,01
МТЗ, гр.	0,61	34,12	<0,01

Виявлені ознаки за рівнем мінливості відповідали тим же при факторному аналізі. Високомінливими були схожість, вживання, фертильність, вага зерна з головного колосу та з рослини, МТЗ, що достовірно відтворювали мутагенну депресію.

Висновки і пропозиції. Як мутаген азид натрію в дії призводить до суттєвого підвищення депресії в першому поколінні в порівнянні з етилметансульфонатом, а сорт Ігроста суттєво поступається за стійкість до обох чинників в порівнянні з сортом Вежа, що швидше за все обумовлено генетично. Різниця між сортами не завжди достовірна при дії нижчих доз та суттєво зростає при її підвищенні. Застосування 0,1 % концентрації ЕМС та 0,05-0,1 % концентрацій азиду натрію суттєво підвищують пряму та віддалену загибель мутантної популяції. Більш оптимальними за рівнем зниження показників є застосування ЕМС у концентраціях 0,025 % та 0,05 % та азиду натрію у концентраціях 0,01 % та 0,025 %. Високу мінливість при підвищенні концентрацій мутагенів мають ознаки схожості, виживання, фертильність, вага зерна з головного колосу та з рослини, МТЗ, котрі можна вважати як ті, що достовірно показують рівень впливу чинників. В подальшому планується проведення аналізу цитогенетичної активності чинників на обох сортах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Beiko V., Nazarenko M. Early depressive effects of epimutagen in the first generation of winter wheat varieties. *Agrology*. 2022. № 5 (2). P. 43–48.
2. Bilgin O., Sarier S., Başer I., Balkan A. Enhancement of androgenesis and plant regeneration from wheat anther culture by seed pre-sowing gamma irradiation. *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty*. 2022. № 19 (2). P. 354–365.
3. Ergün N., Akdoğan G., Ünver İkincikarakaya S., Aydoğan S. Determination of Optimum Gamma Ray Irradiation Doses for Hulled Barley (*Hordeum vulgare* var. *nudum* L. Hook. f.) Genotypes. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*. 2023. № 33. P. 219–230.
4. Jalal A., Oliveira J., Ribeiro J., Fernandes G., Mariano G., Trindade V., Reis A.R. Hormesis in plants: Physiological and biochemical responses. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. № 207. P. 111–225.
5. Gupta S., Datta A., Pramanik A., Biswas J., Karmakar R. X-ray and gamma irradiation induced chromosomal aberrations in plant species as the consequence of induced mutagenesis – an overview. *Plant Archives*. 2019. № 19. P. 1973–1979.
6. Hong M., Kim D., Jo Y., Choi H.-I., Ahn J.-W., Kwon S.-J., Kim S., Seo Y., Kim J.-B. Biological Effect of Gamma Rays According to Exposure Time on Germination and Plant Growth in Wheat. *Applied Sciences*. 2022. № 12. P. 3208.
7. Nazarenko M. Induction of winter wheat plant structure mutations by chemomutagenesis. *Agrology*. 2020. № 3 (1). P. 57–65.
8. OlaOlorun B., Shimelis H., Laing M., Mathew I. Development of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Populations for Drought Tolerance and Improved Biomass Allocation Through Ethyl Methanesulphonate Mutagenesis. *Frontiers in Agronomy*. 2021. № 3. P. 655820.
9. Shabani M., Alemzadeh A., Nakhoda B., Razi H., Houshmandpanah Z., Hildebrand D. Optimized gamma radiation produces physiological and morphological changes that improve seed yield in wheat. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2022. 28 (8). P. 1571–1586.
10. Von Well E., Fossey A., Booyse M. Effect of gamma irradiation on nucleolar activity, an indicator of metabolic activity, in root tip cells of tetraploid *Triticum turgidum* ssp. *durum* L. *Protoplasma*. 2022. № 259 (2). P. 453–468.