

## ВИКОРИСТАННЯ ІНДУКОВАНОГО МУТАГЕНЕЗУ В СЕЛЕКЦІЇ ЗЕРНОВОГО АМАРАНТУ (ОГЛЯДОВА СТАТТЯ)

Пилипець Сергій Олександрович

аспірант

Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

ORCID: 0009-0006-4587-4168

sergejpilipec@gmail.com

Амарант є перспективною сільськогосподарською культурою, посівні площі під якою в Україні та країнах Європейського союзу з кожним роком зростають, що робить його привабливим для сільськогосподарських виробників. Насіння амаранту містить велику кількість легкозасвоюваного білку (до 18 %), ліпідів (до 9,7 %) та комплекс різних вітамінів, потрібних для людського організму. У статті на основі аналізу українських та закордонних літературних джерел проведено оцінку перспективності використання індукованого мутагенезу в селекції амаранту. Розглянуто різні методи мутагенезу, їх ефективність та мутації, які вони індукують на різних сільськогосподарських культурах. Відзначено, що за допомогою використання різних фізичних і хімічних мутагенів у світі створені нові генотипи рослин, з морфологічними та господарсько-цінними ознаками, які неможливо отримати іншими класичними методами селекції. З огляду літературних джерел встановлено, що основним методом індукованого мутагенезу, який застосовувався в селекційній практиці амаранту, було використання фізичного мутагенезу на основі гама-випромінювання і подальше вивчення хромосомних аберацій, якісного складу насіння та фенотипових змін рослин. Водночас майже не вивченим залишається використання хімічного мутагенезу та мутацій, які він індукує. Серед основних мутагенів, що ефективно себе зарекомендували в мутаційній селекції, є алкілюючі речовини, такі як диметилсульфат, етилметансульфонат, етиленімін та інші. Проаналізувавши літературні джерела, відмічено, що етилметансульфонат є одним із перспективним хімічних мутагенів, який був успішно використаний на різних сільськогосподарських культурах, таких як пшениця, кукурудза, кіноа, льон олійний та інших, при створенні однолокусних та багатолокусних мутацій. Втім, досліджень по вивченню впливу мутагену етилметансульфонату на зернові види роду *Amaranthus* не проводилося, що робить даний напрямок перспективним для подальших наукових досліджень та створення нових генотипів амаранту з покращеними господарсько-цінними ознаками.

**Ключові слова:** амарант, селекція, мутагенез, мутації, етилметансульфонат.

DOI <https://doi.org/10.32782/agrobio.2023.2.11>

**Вступ.** Амарант є давньою сільськогосподарською культурою, культивуванням якої займалися цивілізації майя, ацтеків та інків у Південній та південно-західній частині Північної Америки (Sreelathakumary et al., 1993; Singh et al., 2015; Гопцій та ін., 2018). Хромосомний набір роду *Amaranthus* представлений правильним диплоїдним набором  $2n = 32$  або  $34$  (Haldavnekar et al., 2020; Kandel et al., 2021). Згідно різних таксономічних класифікацій дослідників у родини *Amaranthaceae* виділяють від 50 (Sreelathakumary et al., 1993), до близько 75 видів, серед яких 10 дводомні, а 65 видів однодомні (Steckel et al., 2007). Втім, згідно з даними міжнародної організації «The Plant List» на період 2023 року виділяється 112 видів та природних популяцій міжвидових гібридів родини *Amaranthaceae*. Рід *Amaranthus* має космополітичне поширення. Тобто, ареалом даного таксону є більшість території планети (Sindu et al., 2019; Stetter et al., 2017; Brenner et al., 2013).

Основну цінність для сільського господарства представляють зернові види амаранту *Amaranthus caudatus* L., *A. cruentus* L. і *A. hypochondriacus* L. Найбільш поширеним та цінним для сільського господарства є вид *A. hypochondriacus* L. (Kandel et al., 2021; Aderibigbe et al., 2022).

**Результати.** В Україні основний внесок в інтродукцію, селекцію та технологію вирощування амаранту зробила професор Гопцій Т. І. у Харківському національному

аграрному університеті ім. В. В. Докучаєва (нині Державний біотехнологічний університет). Завдяки розробленій селекційній програмі були створені сорти зернового (Харківський-1, Ультра, Сем, Лера та Студентський) і декоративного амаранту (Роганський, Вогняна кулька та Надія), що внесені до Державного реєстру сортів рослин придатних для поширення в Україні, а також опубліковано ряд наукових публікацій та монографій (Гопцій та ін., 2018; Гопцій, 2002; Гопцій, 1999; Гопцій та ін., 2009; Гопцій, 2004; Несміян та ін., 2015; Гудковська та ін. 2018).

Амарант є цінною нішевою сільськогосподарською культурою, оскільки є джерелом великої кількості амінокислот та мінералів. Зокрема, зерно амаранту містить велику кількість (16–18 %) легко засвоюваного багатого на лізин білку, що є рідкістю для рослинних продуктів, а також ліпідів (1,9–9,7 %) та має антиоксидантні властивості. Крім того, зерно та листя амаранту містить багато заліза, кальцію, магнію, фосфору, калію, цинку та інших мінералів, а також вітаміни групи В, Е та С (Pal et al., 1974; Gupta et al., 1990; Das et al., 2012; Abalone et al., 2004; Rodas et al., 2009; Bruni et al., 2001; Гопцій та ін. 2018).

Враховуючи перспективність культури, а також збільшення її посівних площ і споживання в Україні та країнах Європи (Europe Amaranth Market Size), важливим питанням залишається ведення селекційної роботи з амарантом і створення нових сортів з покращеними адаптивними та господарсько-корисними характеристиками.

Одним із методів селекції є індукований мутагенез, що дозволяє за короткий період отримати новий вихідний матеріал з різними морфологічними, фізіологічними та біохімічними особливостями, збільшити частоту вихідних мутацій (Mukhailenko et al., 2019; Васько та ін., 2015; ).

Першими зареєстрованими випадками використання індукованого мутагенезу в селекції були дослідження проведені у 1920 роках на культурах кукурудзи та ячменю з використанням рентгенівського випромінювання (Muller, 1927; Stadler, 1928; Mba et al., 2010).

Незабаром після відкриття фізичних мутагенів, які ґрунтувалися на використанні різного роду випромінювання та радіоактивних елементів, у середині ХХ століття були відкриті хімічні мутагени, що в свою чергу спростило роботу для дослідників. Перший хімічний мутаген, який використали для індукції мутацій у дрозофіли був гірчичний газ (Auerbach et al., 1946; Auerbach, 1949). Після чого протягом декількох років був відкритий метансульфонат та ряд інших хімічних мутагенів, які використовуються в селекції рослин по сьогоднішній день (Westergaard, 1957; Sikora et al., 2011).

Мутації використовують як інструмент для дослідження генів та для підвищення генетичної мінливості рослин (Lo et al., 2016). Однак, частота спонтанних мутацій у рослин надто низька і варіює від  $10^{-5}$  до  $10^{-8}$  (Jiang and Ramachandran, 2010). Таким чином, мутагенез є важливим методом збільшення частоти мутацій (Maluszynski et al., 2000; Da Luz et al., 2016), що дозволяє проводити дослідження функціональної геноміки та створювати нові генотипи.

Більшість мутацій, які виникають у рослині призводять до загибелі організму або втрати функції якоего гена. Генетично такі мутації проявляються як рецесивні, а це своєю чергою полягає в тому, що мутантний фенотип не спостерігається в рослині, в якій відбулися мутації. Покоління рослин, вирощених з обробленого мутагеном батьківського генотипу, називається поколінням  $M_1$  і є гетерозиготним за мутаціями, які в ньому виникають. Насіння, утворене на таких рослинах, а також рослини, які виростають з цього насіння, представляють покоління  $M_2$ , в якому гомозиготні рецесивні мутації відокремлюються. Зокрема, така ознака як колір насіння у поколіннях  $M_1$  має материнське походження і всі мутації, які можуть бути пов'язані з кольором насіння будуть проявлятися лише у поколінні  $M_2$  де формується зародок покоління  $M_3$  (Van Harten, 1998; Koornneef, 2002).

Різні мутагени мають свої специфічні особливості впливу на геном рослин. Використання хімічних та фізичних мутагенів зазвичай вважається випадковим мутагенезом, оскільки місце пошкодження структури ДНК неможливо передбачити заздалегідь (Greene et al., 2003). Вплив різних мутагенів на послідовність ДНК також залежить від концентрації, типу та дози мутагену. Після індукування достатньої генетичної варіації наступним кроком буде відбір рослин, які мають бажані змінені ознаки (Jankowicz-Cieslak et al., 2017).

Сьогодні експериментальний мутагенез застосовується в селекції більшості сільськогосподарських культур. Зокрема застосування хімічних та фізичних мутагенів на пшениці дозволило отримати велику кількість нового

вихідного матеріалу (Хоменко, 2006; Назаренко, 2011; Muralkey et al., 2000; Boyd et al., 2006; Moustafa et al., 2019; Kumar et al., 2017; Anwar et al., 2019). Детально було описано процес роботи з мутантами кукурудзи та опису нових її генотипів (Cabrera-Ponce et al., 2019; Куліш та ін., 2020; Oladosu et al., 2016; Novak et al., 1992; Roychowdhury et al., 2013). Завдяки індукованому мутагенезу отримані нові зразки рослин гірчиці та ріпаку (Yadav et al., 2016), кормових бобів (Бабич, 2013), соняшника (Макляк та ін., 2009; Vasko et al., 2019; Encheva et al., 2009), сої (Рябуха та ін., 2012), рису (Ramchander et al., 2015; Thirumeni et al., 2016; Robin et al., 2019) та багатьох інших культур.

Застосування індукованого мутагенезу в селекції амаранту є новим напрямком для даної культури, що мало вивчався. Так, у Словацькій Республіці в період з 2005 року проведені дослідження з використанням радіаційно-індукованого мутагенезу, завдяки чому були зареєстровані перші сорти амаранту "Pribina" (*A. cruentus*) і "Zobor" (*A. hypochondriacus* x *A. hybridus*) (Hricová et al., 2018; Záhorský et al., 2015; Labajová et al., 2011; Hricová et al., 2021; Hricova et al., 2016).

В Україні застосування індукованого мутагенезу на культурі амаранту проводилось декількома дослідниками під керівництвом професора Гопцій Т.І. Зокрема, у роботах Гудим О.В. з дослідження впливу гамма-випромінювання проведено опис схожості, виживаності рослин амаранту (Гудим, 2014) та мінливості їх морфологічних ознак (Гудим, О. В., & Гопцій, 2015). Було досліджено мітотичну активність при впливі гамма-випромінювання і встановлено, що обробка насіння в дозах 400 Гр та 700 Гр призводить до зниження мітотичної активності, а в деяких випадках взагалі до припинення ділення клітин (Hudym, O. V., & Hoptsi, 2016). Отримані мутантні лінії були оцінені за якісними показниками насіння та виявлено нові форми з підвищеним вмістом білка, ліпідів та жирнокислотного складу (Гудим, 2018), а також за іншими господарсько-корисними характеристиками (Hudym et al., 2021, Васько та ін., 2016). Втім, дані дослідження з індукованого мутагенезу в селекції амаранту базуються на використанні різного роду випромінювання, так званих фізичних мутагенів, а використання хімічного мутагенезу залишається майже не вивченим.

Одним з перспективних хімічних мутагенів, що зарекомендував себе в мутаційній селекції сільськогосподарських культур, є етилметансульфонат (ЕМС). Це органічна алкілуюча речовина, що являє собою добре вивчений хімічний мутаген, який викликає нуклеотидні заміни шляхом алкілювання гуаніну (Sega, 1984; Guerola et al., 1975). Загалом, ЕМС викликає точкові мутації, що робить його зручним інструментом для генетичного скринінгу (Kutscher & Shaham, 2014). Зокрема, детальний опис мутацій, які викликає ЕМС наведено у роботі Gengyo-Ando, K., & Mitani (2000). Вивчені оптимальні дози мутагена ЕМС на рослинах цибулі (Singh et al., 2021) та проса (Ramesh et al., 2019).

Практична ефективність використання ЕМС, як супермутагена була висвітлена у наукових публікаціях українських та закордонних дослідників на різних сільськогосподарських культурах.

Обробку ЕМС застосовували для виділення гена, що бере участь у біосинтезі беталаїну у рослин кіноа (Imamura et al., 2018). Серед перших робіт з вивчення ЕМС були дослідження проведені на кукурудзі зі встановлення однолокусних та багатолокусних мутацій (Amano et al., 1965; Neuffer et al., 1963). У рослин роду *Capsicum annuum* L. були отримані генотипи з фенотиповими відмінностями порівняно з вихідною формою (Alcantara et al., 1996). Детальний опис мутацій, отриманих на рослинах томату представлено Shirasawa et al. (2016).

Серед українських дослідників ЕМС використовувався як мутаген для льону олійного (Лях та ін., 2016; Тигова та ін., 2017), ріжю ярого (Комарова, 2014), озимої пшениці (Кіщенко та ін., 2021). Проведено опис впливу ЕМС на покоління  $M_1$  кунжуту та різних видів гірчиці (Повхан та ін., 2013; ), соняшнику (Кутищева та ін. 2017).

**Висновки.** Проведений огляд літературних джерел українських та закордонних дослідників підтверджує ефективність використання індукованого мутагенезу при створенні нових генотипів рослин, а цінність амаранту – як перспективної продовольчої культури. Використання індукованого мутагенезу дозволило знайти нові фенотипові ознаки, підвищити адаптивний потенціал та якість продукції багатьох сільськогосподарських культур, в тому числі й амаранту. Відмічено, що на сьогодні дію хімічних мутагенів на амарант вивчено недостатньо. Тому, використання хімічного мутагенезу може дозволити розширити спектр знань про мутаційну мінливість амаранту та створити нові, покращені за основними господарсько-корисними ознаками генотипи цієї культури, а серед перспективних мутагенів слід виокремити етилметансульфонат.

#### Бібліографічні посилання:

1. Abalone, R., Cassinera, A., Gaston, A., & Lara, M. A. (2004). Some physical properties of amaranth seeds. *Biosystems Engineering*, 89(1), 109-117. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2004.06.012
2. Aderibigbe, O. R., Ezekiel, O. O., Owolade, S. O., Korese, J. K., Sturm, B., & Hensel, O. (2022). Exploring the potentials of underutilized grain amaranth (*Amaranthus* spp.) along the value chain for food and nutrition security: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(3), 656-669. doi: 10.1080/10408398.2020.1825323
3. Alcantara, T. P., Bosland, P. W., & Smith, D. W. (1996). Ethyl methanesulfonate-induced seed mutagenesis of *Capsicum annuum*. *Journal of Heredity*, 87(3), 239-241. doi: 10.1093/oxfordjournals.jhered.a022992
4. Amano, E., & Smith, H. H. (1965). Mutations induced by ethyl methanesulfonate in maize. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 2(4), 344-351. doi: 10.1016/0027-5107(65)90070-9
5. Anwar, R., Ejaz-ul-Islam, Ghaffar, A., & Khan, M. R. (2019). Gamma rays-induced mutations for improving bread-making quality of wheat. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 12(3), 268-274.
6. Auerbach, C. (1949). Chemical mutagenesis. *Biological Reviews*, 24(3), 355-391. doi: 10.1111/j.1469-185X.1949.tb00580.x
7. Auerbach, C., & Robson, J. M. (1946). Chemical production of mutations. *Nature*, 157(3984), 302-302. doi: 10.1038/157302a0
8. Babych, A. O., & Barvinchenko, S. V. (2013). Khimichni mutahenez yak metod otrymannia rozshyrenoho polimorfizmu u bobiv kormovykh [Chemical mutagenesis as a method of obtaining enhanced polymorphism in faba bean]. *Kormy i kormovyrobnytstvo*, (76), 31-36. (in Ukrainian).
9. Boyd, L. A., Smith, P. H., & Hart, N. (2006). Mutants in wheat showing multipathogen resistance to biotrophic fungal pathogens. *Plant pathology*, 55(4), 475-484.
10. Brenner, D. M., Johnson, W. G., Sprague, C. L., Tranel, P. J., & Young, B. G. (2013). Crop-weed hybrids are more frequent for the grain amaranth 'Plainsman' than for 'D136-1'. *Genetic resources and crop evolution*, 60, 2201-2205. doi: 10.1007/s10722-013-0043-8
11. Bruni, R., Medici, A., Guerrini, A., Scalia, S., Poli, F., Muzzoli, M., & Sacchetti, G. (2001). Wild *Amaranthus caudatus* seed oil, a nutraceutical resource from Ecuadorian flora. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(11), 5455-5460. doi: 10.1021/jf010385k
12. Cabrera-Ponce, J. L., Valencia-Lozano, E., & Trejo-Saavedra, D. L. (2019). Genetic modifications of Corn. In *Corn* (pp. 43-85). AACC International Press. doi: 10.1016/B978-0-12-811971-6.00003-6
13. Da Luz, V. K., da Silveira, S. F. S., da Fonseca, G. M., Grolí, E. L., Figueiredo, R. G., Baretta, D., et al. (2016). Identification of variability for agronomically important traits in rice mutant families. *Bragantia* 75, 41-50. doi: 10.1590/1678-4499.283
14. Das, S. (2012). Systematics and taxonomic delimitation of vegetable, grain and weed amaranths: a morphological and biochemical approach. *Genetic resources and crop evolution*, 59, 289-303. doi: 10.1007/s10722-011-9684-7
15. Encheva, J. (2009). Creating sunflower mutant lines (*Helianthus annuus* L.) using induced mutagenesis. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 15, 109-118.
16. *Europe Amaranth Market Size | Industry Report, 2021-2028*. (n.d.). Market Research Reports & Consulting | Grand View Research, Inc. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/europe-amaranth-market>
17. Gengyo-Ando, K., & Mitani, S. (2000). Characterization of mutations induced by ethyl methanesulfonate, UV, and trimethylpsoralen in the nematode *Caenorhabditis elegans*. *Biochemical and biophysical research communications*, 269(1), 64-69. doi: 10.1006/bbrc.2000.2260
18. Greene, E. A., Codomo, C. A., Taylor, N. E., Henikoff, J. G., Till, B. J., Reynolds, S. H., & Henikoff, S. (2003). Spectrum of chemically induced mutations from a large-scale reverse-genetic screen in *Arabidopsis*. *Genetics*, 164(2), 731-740. doi: 10.1093/genetics/164.2.731

19. Guerola, N., & Cerdá-Olmedo, E. (1975). Distribution of mutations induced by ethyl methanesulfonate and ultraviolet radiation in the *Escherichia coli* chromosome. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 29(1), 145–147. doi: 10.1016/0027-5107(75)90028-7
20. Gupta, V. K., & Gudu, S. (1990). Inheritance of some morphological traits in grain amaranthus. *Euphytica*, 46, 79–84. doi: 10.1007/BF00057621
21. Haldavnekar, P. C., Naik, H. P., Bhuvad, A. V., Kapse, V. D., Parulekar, Y. R., Vaidya, K. P., & Khobragade, N. H. (2020). Studies on yield and yield attributing character of amaranth (*Amaranthus* spp.) genotypes under Konkan agro-climatic conditions. *International Journal of Chemical Studies*, 8(1), 117–118. doi: 10.22271/chemi.2020.v8.i1b.8233
22. Hoptsi, T. I. (1999). Amaran: biolohiia, vyroshchuvannia, perspektyvy vykorystannia, selektsiia [Amaranth: biology, cultivation, prospects of use, selection]. *Kharkiv: Kharkivskiy derzhavnyi ahramnyi universytet im. V. V. Dokuchaieva*. (in Ukrainian).
23. Hoptsi, T. I. (2002). Morfolohichni osoblyvosti y biolohichni osnovy vvedennia v kulturu amaranta v umovakh Livoberezhnoho Lisostepu Ukrainy [Morphological features and biological basis of the introduction of amaranth in the conditions of the Left Bank Forest Steppe of Ukraine]. *Visn. Kharkiv. nats. ahram. un-tu. Serii Roslynnnytstvo, selektsiia i nasinnnytstvo, ovochivnytstvo*, (6), 36–51. (in Ukrainian).
24. Hoptsi, T. I. (2004). Polova skhozhist nasinnia amarantu zalezno vid ahroekolohichnykh faktoriv [Field germination of amaranth seeds depending on agroecological factors]. *Visnyk Sumsk. nats. ahram. un-tu. (Serii «Ahronomiia i biolohiia»)*, 6(9), 84–87. (in Ukrainian).
25. Hoptsi, T. I., Voronkov, M. F., Bobro, M. A., Myroshnychenko, L. O., Lymanska, S. V., Hudym, O. V., Hudkovska N. B., & Duda, Yu. V. (2018). *Amarant: selektsiia, henetyka ta perspektyvy vyroshchuvannia* [Amarant: breeding, genetics and cultivation prospects: Monograph]. KhNAU, Kharkiv, 362 (in Ukrainian).
26. Hoptsi, T. I., Voronkov, M. F., Zahoruiko, O. M., Zhuravel, D. V., & Hromenko, S. V. (2009). Amaran bilonasynny (A. hypochondriacus) yak vykhidnyi material v selektsii zernovoho amarantu [White-seeded amaranth (*A. hypochondriacus*) as a starting material in the breeding of grain amaranth]. *Visn. Kharkiv. nats. ahram. un-tu. Serii Roslynnnytstvo, selektsiia i nasinnnytstvo, ovochivnytstvo*, (7), 75–80. (in Ukrainian).
27. Hricova, A., Fejer, J., Libiakova, G., Szabova, M., Gazo, J., & Gajdosova, A. (2016). Characterization of phenotypic and nutritional properties of valuable *Amaranthus cruentus* L. mutants. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 40(5), 761–771. doi: 10.3906/tar-1511-31
28. Hricová, A., Gajdošová, A., Libiaková, G., & Fejér, J. (2018). First Slovak Amaranth Varieties Generated through Radiation Mutagenesis (No. IAEA-CN-263).
29. Hricová, A., Mistríková, V., Gajdošová, A., Fejér, J., Nôžková, J., Kariluoto, S., ... & Szabóová, M. (2021). Comparative analysis reveals changes in some seed properties in amaranth mutant variety 'Zobor' (*A. hypochondriacus* × *A. hybridus*). *Agronomy*, 11(12), 2565.
30. Hudkovska N. B., Hoptsi T. I. (2018). Urozhainist zerna amaranta zalezno vid strokiv ta sposobiv sivby v umovakh Livoberezhnoho Lisostepu Ukrainy [Yielding ability of amaranth seeds depending on the sowing timing and methods in the conditions of the Left-bank forest steppe of Ukraine]. *Visn. KhNAU. Serii: Roslynnnytstvo, selektsiia i nasinnnytstvo, plodoovochivnytstvo i zberihannia*, (2), 112–124. (in Ukrainian).
31. Hudym, O. V. (2014). Vplyv mutahennykh chynnykiv na skhozhist, vyzhyvanist, rist i rozvytok roslyn amaranta [Mutagenic Factors Influence on Germination, Survivability, Growth and Development of amaranth Plants]. *Visn. Kharkiv. nats. ahram. un-tu. Serii "Roslynnnytstvo, selektsiia i nasinnnytstvo, plodoovochivnytstvo"*, (2), 62–67. (in Ukrainian).
32. Hudym, O. V., & Hoptsi, T. I. (2015). Indukovana minlyvist morfolohichnykh oznak u roslyn amaranta pry vykorystanni hamma-oprominennia [Induced changeability of morphological signs of amaranth plants by using gamma-radiation]. *Visn. Kharkiv. nats. ahram. un-tu. Serii "Roslynnnytstvo, selektsiia i nasinnnytstvo, plodoovochivnytstvo"*, (2), 66–74. (in Ukrainian).
33. Hudym, O. V., & Hoptsi, T. I. (2016). Vplyv peredposivnoi obrobky nasinnia amarantu hamma-promeniemy na chastotu vynykennia mitotychnykh porushen v korenevii merystemi roslyn [Influence of presowing gamma – irradiation of amaranth seeds on the frequency of mitotic disorders in root meristem]. *Selektsiia i nasinnnytstvo*, (109), 119–124. doi: 10.30835/2413-7510.2016.74209 (in Ukrainian).
34. Hudym, O. V., Lymanska, S. V., Goptsiy, T. I., Turchynova, N. P., Mykhailenko, V. O., Kryvoruchenko, R. V., ... & Stankevych, S. V. (2021). Amaranth variability at different doses of gamma radiation. *Ukrainian Journal of Ecology*, 11(8), 146-151.
35. Imamura, T., Takagi, H., Miyazato, A., Ohki, S., Mizukoshi, H., & Mori, M. (2018). Isolation and characterization of the betalain biosynthesis gene involved in hypocotyl pigmentation of the allotetraploid *Chenopodium quinoa*. *Biochemical and biophysical research communications*, 496(2), 280–286. doi: 10.1016/j.bbrc.2018.01.041
36. Jankowicz-Cieslak, J., Tai, T. H., Kumlehn, J., & Till, B. J. (2017). Biotechnologies for plant mutation breeding: protocols (p. 340). Springer Nature. doi: 10.1007/978-3-319-45021-6
37. Jiang, S.-Y., Ramachandran, S. (2010). Assigning biological functions to rice genes by genome annotation, expression analysis and mutagenesis. *Biotechnol. Lett.* 32, 1753–1763. doi: 10.1007/s10529-010-0377-7
38. Kandel, M., Rijal, T. R., & Kandel, B. P. (2021). Evaluation and identification of stable and high yielding genotypes for varietal development in amaranthus (*Amaranthus hypochondriacus* L.) under hilly region of Nepal. *Journal of Agriculture and Food Research*, 5, 100158. doi: 10.1016/j.jafr.2021.100158
39. Khomenko, S. O. (2006). Efektyvnist obrobky hibrydiv mutahenamy dla stvorennia konkurentnospromozhnykh sortiv pshenytsi ozymoi miakoi [Efficacy of hybrids in order to establish competitive varieties of soft winter wheat]. *Plant varieties studying and protection*, (4), 25–31. doi: 10.21498/2518-1017.4.2006.67745 (in Ukrainian).
40. Kishchenko, O., Stepanenko, A., & Borysiuk, M. (2021). Indukovanyi mutahenez pshenytsi: vid radioaktyvnoho oprominennia do spetsyficnoho redahuvannia heniv [Induced mutagenesis in wheat: from ionizing radiation to site-specific gene editing]. *Fiziolohiia roslyn i henetyka*, 53(1), 30–54. (in Ukrainian).

41. Komarova, I. B. (2014). Morfolohichni mutanty ryzhiu yarohto zi zminenym zhyrnokyslotnym skladom olii [Morphological mutants of spring false flax with the altered fat and acid composition of oil]. *Kormy i kormovyrobnytstvo*, (78), 13–18. (in Ukrainian).
42. Koornneef, M. (2002). Classical mutagenesis in higher plants. *Molecular plant biology*, 1, 1–11.
43. Kulish, O., & Parii, M. (2020). Novyi morfotyp ovochevoi kukurudzy, otrymani metodom eksperymentalnoho mutahenezu [New morphotype of vegetable corn obtained by the method of experimental mutagenesis]. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 98(10), 39–47. doi: 10.31073/agrovisnyk202010-06 (in Ukrainian).
44. Kumar, A., Kumar, J., & Singh, S. K. (2017). Induced Mutations for Wheat Improvement. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 77(4), 579–594.
45. Kutscher, L. M., & Shaham, S. (2014). Forward and reverse mutagenesis in *C. elegans*. *WormBook: the online review of C. elegans biology*, 1–26. doi: 10.18955/2Fwormbook.1.167.1
46. Kutysheva, N. M., Shudria, L. I., & Sereda, V. O. (2017). Morfolohichni oznaky perspektyvnykh linii soniashnyku [Morphological characteristics of perspective sunflower lines]. *Naukovo-tekhnichnyi biuleten Instytutu oliinykh kultur NAAN*, (24), 85–93. (in Ukrainian).
47. Labajová, M., Senková, S., Žiarovská, J., Ražná, K., Bežo, M., Štefúnová, V., & Zeleňáková, L. (2011). The potential of ISSR markers in Amaranth gamma-radiance mutants genotyping. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 2021, 507–521.
48. Liakh, V. O., & Peretiak, A. O. (2016). Indukovanyi khimichnym mutahenom spektr spadkovykh zmin u lonu oliinoho sortu Soniachnyi [Induced with chemical mutagen the spectrum of hereditary changes in linseed of solnechny variety]. *Aktualni pytannia biolohii, ekolohii ta khimii*, 12(2), 16–24. (in Ukrainian).
49. Lo, S. F., Fan, M. J., Hsing, Y. I., Chen, L. J., Chen, S., Wen, I. C., & Yu, S. M. (2016). Genetic resources offer efficient tools for rice functional genomics research. *Plant, cell & environment*, 39(5), 998–1013. doi: doi.org/10.1111/pce.12632
50. Makliak, K. M., Kyrychenko, V. V., & Brahin, O. M. (2009). Seleksiia novykh linii-zakriplivachiv sterilnosti soniashnyku [Selection of new sunflower sterility fixing lines]. *Seleksiia i nasinnytstvo*, (97), 13–19. doi: 10.30835/2413-7510.2009.77036 (in Ukrainian).
51. Maluszynski, M., Nichterlein, K., Van Zanten, L., Ahloowalia, S., (2000). *Officially released mutant varieties – the FAO/IAEA Database (INIS-XA–291)*. International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA.
52. Mba, C., Afza, R., Bado, S., & Jain, S. M. (2010). Induced mutagenesis in plants using physical and chemical agents. *Plant cell culture: essential methods*, 20, 111–130. doi: 10.1002/9780470686522.ch7
53. Moustafa, K. A., & El-Awady, M. A. (2019). Induced mutation breeding in wheat for enhancing productivity and yield stability. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 17(1), 1–9.
54. Muller, H. J. (1927). Artificial transmutation of the gene. *Science*, 66(1699), 84–87. doi: 10.1126/science.66.1699.84
55. Muralkey, M., & Jons, M. (2000). Isolation and analysis of termotolerance mutant of wheat. *J. Exp. Bot.*, 342(51-P), 139–146.
56. Mykhailenko, V., Kyrychenko, V., Bragin, A., & Chuiko, D. (2019). Generation, Evaluation, and Prospects of Further Use of Mutations Based on New Homozygous Self-Pollinated Sunflower Lines. In *Genotoxicity and Mutagenicity-Mechanisms and Test Methods*. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.89563
57. Nazarenko, M. M. (2011). Rozshyrennia riznomanittia vykhidnoho materialu dlia seleksii pshenytsi miakoi ozymoi [Increasing of diversity of source material for breeding of bread winter wheat]. *Henetychni resursy roslyn*. (9), 147–154. (in Ukrainian).
58. Nesmiiian O. V., Hoptsi T. I. (2015). Adaptivnyi potentsial zernovoho amaranta v umovakh Livoberezhnoho Lisostepu Ukrainy [Adaptive potential of grain amaranth in a left-bank forest-steppe of Ukraine]. *Visnyk KhNAU. Serii : Roslynnytstvo, seleksiia i nasinnytstvo, plodoovochivnytstvo*, (1), 98–108. (in Ukrainian).
59. Neuffer, M. G., & Ficsor, G. (1963). Mutagenic action of ethyl methanesulfonate in maize. *Science*, 139(3561), 1296–1297. doi: 10.1126/science.139.3561.1296
60. Novak FJ, Brunner H. Plant breeding: Induced mutation technology for crop improvement. *IAEA Bull.* 1992 Apr;4:25–33.
61. Oladosu, Y., Rafii, M. Y., Abdullah, N., Hussin, G., Ramli, A., Rahim, H. A., & Usman, M. (2016). Principle and application of plant mutagenesis in crop improvement: a review. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 30(1), 1–16. doi: 10.1080/13102818.2015.1087333
62. Pal, M., & Khoshoo, T. N. (1974). Grain amaranths. Evolutionary studies in world crops: diversity and change in the Indian subcontinent. *Cambridge University Press, UK*, 129–137.
63. Ramchander, S., Ushakumari, R., & Pillai, M. A. (2015). Lethal dose fixation and sensitivity of rice varieties to gamma radiation. *Indian Journal of Agricultural Research*, 49(1), 24–31. doi: 10.5958/0976-058X.2015.00003.7
64. Ramesh, M., Vanniarajan, C., Ravikesavan, R., Aiyar, K. E. A., & Mahendran, P. P. (2019). Determination of lethal dose and effect of EMS and gamma ray on germination percentage and seedling parameters in barnyard millet variety Co (Kv) 2. *Electronic Journal of Plant Breeding*, 10(2), 957–962. doi: 10.5958/0975-928X.2019.00123.6
65. Riabukha, S. S., Chernyshenko, P. V., & Sierikova, L. H. (2012). Efektyvnist zastosuvannia khimichnykh mutaheniv v seleksii soi [Effectiveness of using chemical mutagens in soybean selection]. *Seleksiia i nasinnytstvo*, (102), 60–65. doi: 10.30835/2413-7510.2012.59821 (in Ukrainian).
66. Robin, S., Pushpam, R., Rajeswari, S., Amudha, K., Jeyaprakash, P., Manonmani, S., ... & Ganesamurthy, K. (2019). CO 52 (IET 25487): A highly remunerative medium duration fine grain rice variety. *Electronic Journal of Plant Breeding*, 10(3), 1148–1160. doi: 10.5958/0975-928X.2019.00146.7

67. Rodas, B., & Bressani, R. (2009). The oil, fatty acid and squalene content of varieties of raw and processed grain amaranth. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 59(1), 82–87.
68. Roychowdhury R, Tah J, Hakeem KR, Ahmad P, Ozturk M. Crop improvement: new approaches and modern techniques. *Mutagenesis. Potential Approach for Crop Improvement*. 2013:149–188.
69. Sega, G. A. (1984). A review of the genetic effects of ethyl methanesulfonate. *Mutation Research/Reviews in Genetic Toxicology*, 134(2-3), 113–142. doi: 10.1016/0165-1110(84)90007-1
70. Shirasawa, K., Hirakawa, H., Nunome, T., Tabata, S., & Isobe, S. (2016). Genome-wide survey of artificial mutations induced by ethyl methanesulfonate and gamma rays in tomato. *Plant biotechnology journal*, 14(1), 51–60. doi: 10.1111/pbi.12348
71. Sikora, P., Chawade, A., Larsson, M., Olsson, J., & Olsson, O. (2011). Mutagenesis as a tool in plant genetics, functional genomics, and breeding. *International journal of plant genomics*. doi: 10.1155/2011/314829
72. Sindu, A., Kumar, V. N. S. A., Vishnu, W. K., & Kumar, T. R. (2019). *Amaranthus saradhiana* (Amaranthaceae)-a new species from southern Western Ghats of Kerala, India. *Phytotaxa*, 403(3), 230–238. doi: 10.11646/phytotaxa.403.3.7
73. Singh, H., Verma, P., Lal, S. K., & Khar, A. (2021). Optimization of EMS mutagen dose for short day onion. *Indian Journal of Horticulture*, 78(1), 35–40. doi: 10.5958/0974-0112.2021.00005.0
74. Singh, R., Yadav, H., & Pandey, R. (2015). Genotype × Environment interactions and stability analysis for grain yield and protein content in grain amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.). *Trends in Biosciences*, 8(15), 3791–3796.
75. Sreelathakumary, I., & Peter, K. V. (1993). *Amaranthus* spp. In *Genetic improvement of vegetable crops* (pp. 315–323). Pergamon. doi: 10.1016/B978-0-08-040826-2.50026-6
76. Stadler, L. J. (1928). Mutations in barley induced by X-rays and radium. *Science*, 68(1756), 186–187. doi: 10.1126/science.68.1756.186
77. Steckel, L. E. (2007). The dioecious *Amaranthus* spp.: here to stay. *Weed Technology*, 21(2), 567–570. doi: 10.1614/WT-06-045.1
78. Stetter, M. G., & Schmid, K. J. (2017). Analysis of phylogenetic relationships and genome size evolution of the *Amaranthus* genus using GBS indicates the ancestors of an ancient crop. *Molecular phylogenetics and evolution*, 109, 80–92. doi: 10.1016/j.ympev.2016.12.029
79. Thirumeni, S., Seetharam, K., Paramasivam, K., & Souframaijen, J. (2016). Induced mutagenesis in rice (*Oryza sativa* L.) for improving salt tolerance. *ORYZA-An International Journal on Rice*, 53(4), 385–390.
80. Tihova, A., & Soroka, A. (2019). Vykorystannia novykh pokhidnykh dymetylsulfatu dlia otrymannia spadkovykh zmin u lonu oliinoho [Use of new derivatives of dimethyl sulphate for deriving hereditary variations at oil flux]. *Visnyk ahraryi nauky*, 97(4), 52–59. doi: 10.31073/agrovisnyk201904-08 (in Ukrainian).
81. Van Harten, A. M. (1998). Mutation breeding: theory and practical applications (Vol. 1). Cambridge University Press.
82. Vasko, O. V., Hudym, V. O., & Rozhak, H. O. (2015). Zastosuvannia eksperymentalnoho mutahenezu v selektsii roslyn [Application of experimental mutagenesis in plant breeding]. *Selektsiia i nasynnytstvo*, (107), 8–18. (in Ukrainian).
83. Vasko, V. O., & Kyrychenko, V. V. (2019). Induced mutagenesis for the creation of new starting material in sunflower breeding. *Helia*, 42(70), 17–36. doi: 10.1515/helia-2017-0024
84. Vasko, V.O., Hudym, O.V., Hoptsi, T.I., Kyrychenko, V.V. (2016). Minlyvist morfolohichnykh oznak roslyn pid vplyvom hamma-promeniv [Morphological variability features of plants under the influence of gamma-rays]. *Visn. KhNAU. Seriia : Roslynnytstvo, selektsiia i nasynnytstvo, plodoovochivnytstvo i zberihannia*, (1), 133–140. (in Ukrainian).
85. Westergaard, M. (1957). Chemical mutagenesis in relation to the concept of the gene. *Experientia*, 13, 224–234. doi: 10.1007/BF02157427
86. Yadav, P., Meena, H. S., Meena, P. D., Kumar, A., Gupta, R., Jambhulkar, S., ... & Singh, D. (2016). Determination of LD50 of ethyl methanesulfonate (EMS) for induction of mutations in rapeseed-mustard. *Journal of Oilseed Brassica*, 1(1), 77–82.
87. Záhorský, M., Socha, P., Gažo, J., Ostrovský, R., & Hricová, A. (2015). Starch variability in amaranth mutants induced by radiation mutagenesis. *Recent Advances in Neglected and Under-utilized Species Research*, 31–34.
88. Zhuravel, V. M. (2011). Seleksiina tsinnist zrazkiv hirchytsi biloi, stvorenykh metodom khimichnoho mutahenezu [Breeding importance of sinapis alba specimens, created with the method of chemical mutagenesis]. *Naukovo-tekhnichnyi biuleten IOK UAAN*, (16), 53–58. (in Ukrainian).

**Pylypets S. O.**, PhD Student, State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

**The use of induced mutagenesis in grain amaranth breeding (review)**

*Amaranth is a promising agricultural crop, the sown area under which is increasing in Ukraine and the countries of the European Union every year, which makes it attractive for agricultural producers. Amaranth seeds contain a large amount of easily digestible protein (up to 18%), lipids (up to 9.7%) and a complex of various vitamins necessary for the human body. In the article, based on the analysis of Ukrainian and foreign literary sources, an assessment of the prospects of using induced mutagenesis in amaranth breeding is carried out. Various methods of mutagenesis, their effectiveness and the mutations they induce on various agricultural crops are considered. It was noted that with the help of the use of various physical and chemical mutagens, new plant genotypes were created in the world, with morphological and economically valuable traits that cannot be obtained by other classical breeding methods. Based on a review of literary sources, it was established that the main method of induced mutagenesis, which was used in amaranth breeding practice, was the use of physical mutagenesis based on gamma radiation and the subsequent study of chromosomal aberrations, qualitative composition of seeds and phenotypic changes of plants. At the same time, the use of chemical mutagenesis and the mutations it induces*

remain almost unexplored. Among the main mutagens that have effectively proven themselves in mutational selection are alkylating substances, such as dimethyl sulfate, ethyl methanesulfonate, ethyleneimine, and others. After analyzing literary sources, it was noted that ethyl methanesulfonate is one of the promising chemical mutagens, which was successfully used on various agricultural crops, such as wheat, corn, quinoa, linseed, and others to create single-locus and multilocus mutations. However, studies on the influence of the mutagen ethyl methanesulfonate on grain species of the genus *Amaranthus* have not been conducted, which makes this direction promising for further scientific research and the creation of new genotypes of amaranth with improved economically valuable traits.

**Key words:** amaranth, breeding, mutagenesis, mutations, ethyl methanesulfonate.