

••• ГЕНЕТИКА ••• GENETICS •••

DOI: 10.26565/2075-5457-2023-41-4
УДК: 575.174.4:595.772:539.1.047

Параметри добору в лініях *Drosophila melanogaster* Meig., отриманих з популяцій, що мешкають на територіях з різним рівнем радіаційного забруднення: апробація метода Кроу

М.Д. Лук'янов, А.С. Златев, Є.В. Вакуленко, Д.О. Скоробагатько, О.О. Мазілов, В.Ю. Страшнюк

Техногенні катастрофи, такі як аварії на Чорнобильській АЕС та АЕС Фукусіма-1, по-новому гостро поставили питання про радіаційні ризики, пов'язані з використанням енергії атома. Метою роботи було дослідити особливості дії природного добору в лініях *Drosophila melanogaster* Meig., отриманих з природних популяцій, які мешкають на територіях з різним рівнем радіаційного забруднення. Одним із завдань було випробувати на модельному об'єкті – дрозофілі – метод Кроу, який дозволяє оцінити загальну інтенсивність добору, а також визначити внесок окремих його компонентів, таких як диференційна плодючість і диференційна смертність. Дослідження проведене на трьох лініях *Drosophila melanogaster* Meig.: лінія *Гайдари* (радіаційний фон на території, звідки походить лінія: 0,12 мкЗв/год, потік β -випромінювання: 0 часток/см²/хв), лінія *ХФТІ* (радіаційний фон: 0,12–0,20 мкЗв/год, потік β -випромінювання: 0 часток/см²/хв), лінія *Чорнобиль* (радіаційний фон: 0,20–0,22 мкЗв/год, потік β -випромінювання: 7–8 часток/см²/хв). За результатами дослідження, лінії не відрізнялися між собою за яйцепродукцією самок. За кількістю нащадків імаго лінія *Чорнобиль* поступалася лініям *Гайдари* та *ХФТІ* на 48,9% і 57,8% відповідно. Смертність у дорепродуктивний період розвитку (показник r_d), що включає в себе ембріональну і лялечкову смертність, була найвищою в лінії *Чорнобиль* і перевищувала значення r_d в лініях *Гайдари* та *ХФТІ* в 1,4 раза. Як наслідок, лінія *Чорнобиль*, отримана з території, забрудненої радіонуклідами, суттєво перевищувала лінії *Гайдари* та *ХФТІ*, що отримані з території, на якій радіаційна ситуація не виходить за межі норми, за обома компонентами добору – як за компонентом диференційної плодючості (I_f), так і за диференційною смертністю (I_m). У підсумку, загальні індекси добору (I_{tot}) були досить близькими в лініях *Гайдари* і *ХФТІ*, а в лінії *Чорнобиль* цей показник був у 2,1–2,6 раза вищий, ніж у двох інших лініях. Результати дослідження підтверджують точку зору, згідно з якою іонізуюче випромінювання може сприяти еволюції, прискорюючи еволюційні зміни. Вони свідчать про підвищений рівень смертності, знижений рівень пристосованості та посилений тиск добору в лінії плодкових мух, яка походить з популяції, що мешкає на радіаційно забрудненій території у зоні відчуження ЧАЕС.

Ключові слова: γ -випромінювання, β -випромінювання, плодючість, ембріональна смертність, лялечкова смертність, індекси добору.

Цитування: Лук'янов М.Д., Златев А.С., Вакуленко Є.В., Скоробагатько Д.О., Мазілов О.О., Страшнюк В.Ю. Параметри добору в лініях *Drosophila melanogaster* Meig., отриманих з популяцій, що мешкають на територіях з різним рівнем радіаційного забруднення: апробація метода Кроу. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Біологія», 2023, 41, 41–50. <https://doi.org/10.26565/2075-5457-2023-41-4>

Про авторів:

М.Д. Лук'янов – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, Харків, 61022, Україна, mike.gessen@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-0992-3538>

А.С. Златев – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, Харків, 61022, Україна, fantom9531@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-1028-9628>

Є.В. Вакуленко – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, Харків, 61022, Україна, vakulenkoevgenij353@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-8647-8949>

Д.О.Скоробагатько – ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут», вул. Академічна, 1, Харків, 61108, Україна, d.skorobagatko86@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3239-9004>

О.О. Мазілов – ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут», вул. Академічна, 1, Харків, 61108, Україна, alexeu.mazilov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7688-1527>

В.Ю. Страшнюк – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, Харків, 61022, Україна; Інститут фізіології рослин і генетики Болгарської академії наук, вул. Акад. Г. Бончев, 21, Софія, 1113, Болгарія, volodymyr.strashnyuk@karazin.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8343-866X>

Подано до редакції: 16.07.2023 / Прорецензовано: 23.10.2023 / Прийнято до друку: 22.11.2023

Вступ

Існує багато різних джерел іонізуючого випромінювання, які впливають на живі організми. Серед них природний радіаційний фон, присутній в екосистемах, випробування ядерної зброї, ядерні технології, що використовуються у різних галузях виробництва та у медицині. Техногенні катастрофи, найбільш відомими з яких є Киштинська аварія на хімкомбінаті «Маяк» у закритому місті «Челябінськ-40» (1957 р.), аварії на Чорнобильській АЕС (1986 р.) та АЕС Фукусіма-1 (2011 р.), поновому гостро поставили питання про радіаційні ризики, пов'язані з використанням енергії атома.

Дослідження впливу іонізуючого випромінювання на різні аспекти життєдіяльності організмів має тривалу історію. Багато уваги приділяється вивченню фізіологічних (Einor et al., 2016), генетичних (Alexander, Bergendahl, 1964; Golub, Chernyuk, 2008; Skorobagatko et al., 2020), у тому числі епігенетичних (Vaiserman, 2011; Guerrero-Bosagna et al., 2014) наслідків опромінення. Більшість досліджень було проведено в лабораторних умовах, але, як відзначають різні автори, їх результати не можна перенести на популяційні процеси (Козерецькая и др., 2008; Kivisaari et al., 2020). Дослідження дії радіації на біологічні об'єкти у природних популяціях мають певні особливості, серед яких можна відзначити наступне:

(1) Зазвичай у лабораторних умовах вивчають дію на організми різних доз гострого опромінювання. У природних умовах на радіаційно забруднених територіях живі організми в більшій мірі зазнають впливу хронічного опромінення низької інтенсивності.

(2) Наслідком техногенних катастроф є накопичення у середовищі довгоіснуючих радіоактивних ізотопів, таких як цезій-137 (Cs^{137}) і стронцій-90 (Sr^{90}). Через тривалий період напіврозпаду (приблизно 30 років), їх ефект зберігається десятиліттями (Baba, 2013). Із ґрунту та повітря, в процесі живлення та через питну воду радіоактивні елементи можуть потрапляти в організми (Murakami et al., 2015) і спричинити пошкодження клітин.

(3) За думкою експертів (Garnier-Laplace et al., 2013; Mothersill et al., 2019; Kivisaari et al., 2020), дика природа може бути більш чутливою до іонізуючого опромінювання, ніж тварини, які використовуються в лабораторних дослідженнях, що пояснюється наявністю інших чисельних стресорів у природному середовищі.

Внаслідок опромінювання в популяціях організмів накопичуються мутації (Møller, Mousseau, 2016; Якимчук, 2018), підвищуються рівні ембріональної та постембріональної смертності, що також впливає на репродуктивні показники (Костенко и др., 2008; Проценко и др., 2008; Филипченко и др., 2008). Іншими словами, існування в умовах хронічного опромінювання зачіпає основні ознаки, що характеризують пристосованість організмів. Вочевидь, радіаційне забруднення території, на якій проживає популяція, має впливати на інтенсивність дії природного добору, що є передумовою пристосування популяції до нових умов. Однак, незважаючи на велику кількість популяційних досліджень на радіаційно забруднених територіях, тиск природного добору на цих територіях не був оцінений.

Метою роботи було дослідити особливості дії природного добору у лініях *Drosophila melanogaster* Meig., отриманих з природних популяцій, які мешкають на територіях з різним рівнем радіаційного забруднення. Завданням роботи було оцінити загальну інтенсивність добору, а також визначити внесок окремих його компонент, таких як диференційна плодючість і диференційна смертність. Одним із завдань була апробація на модельному об'єкті – дрозофілі – метода Кроу (Crow, 1958), який був розроблений для дослідження людських популяцій (Atramentova et al., 2013; Kozak, Atramentova, 2021). Зважаючи на універсальність явища природного добору, можна очікувати, що підхід, запропонований Кроу, буде корисним для оцінки селективного тиску у роботі з іншими об'єктами, зокрема, з плодовою мушкою *Drosophila melanogaster* Meig.

Об'єкти та методи дослідження

Дослідження проведено на трьох лініях *Drosophila melanogaster*, отриманих з природних популяцій, що мешкають на територіях з різним рівнем радіаційного забруднення. Вимірювання рівнів радіаційного фону проведено фахівцями науково-дослідної лабораторії «Радіаційних досліджень і охорони навколишнього середовища» ННЦ ХФТІ. Вимірювання гама-випромінювання відбувалося на висоті 1 м над рівнем ґрунту, бета-випромінювання – на висоті 0,1 м від поверхні землі, згідно з методиками вимірювань потужності еквівалентної дози іонізуючого випромінювання та щільності потоку іонізуючих часток (γ -випромінювання характеризує загальний радіаційний фон, β -випромінювання – рівень забруднення техногенними радіонуклідами). Використовували метрологічно перевірені дозиметри та дозиметри-радіометри ДБГ-01Н, МКС-05 «ТЕРРА» та ДКС-96.

Лінія *Гайдари* – отримана з природної популяції на території біостанції ХНУ поблизу села Гайдари Зміївського району Харківської області. Було отримано 8 ізосамкових ліній. Радіаційний фон становив 12 мкЗв/год, потік β-випромінювання – 0 часток/см²/хв.

Лінія *ХФТІ* – отримана з природної популяції на території ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» (ХФТІ), м. Харків. Було отримано 8 ізосамкових ліній. Радіаційний фон становив 0,12–0,20 мкЗв/год (0,20 мкЗв/год – при працюючих прискорювачах), потік β-випромінювання – 0 часток/см²/хв.

Лінія *Чорнобиль* – отримана з природної популяції м. Чорнобиль. Було отримано 7 ізосамкових ліній. Радіаційний фон становив 0,20–0,22 мкЗв/год, потік β-випромінювання: 7–8 часток/см²/хв.

Мушки були відловлені у вересні 2021 року. Після двох генерацій мух з ізосамкових ліній, отриманих з кожної окремої популяції, об'єднували і в подальшому лінії підтримували шляхом масового розведення та аутбридингу.

У 3–4-му поколіннях в лініях досліджували показники яйцепродукції самок та ембріональної смертності. У 6–9-му поколіннях досліджували кількість нащадків імаго та лялечкову смертність. Компоненти пристосованості вивчали із використанням сліпого методу.

Яйцепродукцію і ембріональну смертність досліджували за класичним методом (Тихомирова, 1990). По 10 самок у віці чотирьох діб після спарювання з самцями саджали у чашки Петрі, де вони протягом восьми годин відкладали яйця. Після того вели облік відкладених яєць, а через 48 годин – облік ембріональних леталей (ЕЛ). Яйцепродукцію визначали у розрахунку на одну самку. Ембріональну смертність розраховували як частку особин, що загинули на ембріональній стадії розвитку, від загального числа відкладених самками запліднених яєць за сумою ранніх (РЕЛ) і пізніх (ПЕЛ) леталей. Яйцепродукцію досліджували у шести повторностях експерименту, ембріональні леталі – у трьох повторностях. У роботі наведені дані за сумою повторностей.

Кількість нащадків імаго визначали як потомство, отримане від однієї пари мух батьківського покоління. Для цього мух попарно саджали у стаканчики з живильним середовищем на 6 діб. Використовували скляні стаканчики, об'ємом 60 мл, які містили 10 мл стандартного цукрово-дріжджового живильного середовища. Лялечкову смертність визначали як частку нерозвинених лялечок від загальної кількості лялечок. У кожній повторності досліджували потомство від 10–11-ти пар мух. Проведено три повторності експериментів, результати яких загалом відтворювалися. В роботі наведені дані за сумою трьох повторностей.

Для вивчення окремих компонент добору та інтенсивності добору в цілому використовували методику, запропоновану Кроу (Crow, 1958; Atramentova et al., 2013). Згідно з цим, основними параметрами добору є:

(1) I_f – компонента добору, що пов'язана з диференційною плодючістю, розраховується за формулою:

$$I_f = \sigma_k^2 / k_{cp}^2,$$

де показник k_{cp} характеризує середню кількість нащадків, які досягли статевої зрілості, у розрахунку на одну самку, σ_k^2 – це дисперсія плодючості;

(2) I_m – є показником диференційної смертності, розраховується як відношення смертності/виживання, тобто частки особин, що загинули до репродуктивного віку (компонента p_d), до частки особин, що вижили (компонента p_s):

$$I_m = p_d / p_s,$$

(3) I_{tot} – загальний індекс добору, що характеризує максимально можливий рівень селективного тиску, розраховується на основі показників диференційної плодючості та диференційної смертності у дорепродуктивний період розвитку за рівнянням:

$$I_{tot} = I_m + I_f / p_s.$$

Проведено статистичний аналіз даних. Перевірку на нормальність розподілів проводили за критерієм Шапіро – Уїлка. При вивченні яйцепродукції самок та кількості нащадків імаго застосовували дисперсійний аналіз. Відмінності між дослідними групами визначали за t -критерієм Стюдента із застосуванням поправки Бонферроні для множинних порівнянь. Ембріональну та лялечкову смертність досліджували методом аналізу часток за F -критерієм Фішера.

На рисунках дані представлені як середнє значення ознаки ± стандартна похибка. Відмінності між лініями вважали значущими за $p \leq 0,05$.

Результати та обговорення

В лініях дрозофіли, отриманих з природних популяцій, що мешкають на територіях з різним рівнем радіаційного забруднення, досліджували компоненти пристосованості: яйцепродукцію самок, кількість нащадків імаго, ембріональну та лялечкову смертність.

Тест Шапіро – Уїлка показав, що розподіл значень яйцепродукції самок у досліджуваних лініях відповідає нормальному закону (показник W у різних ліній варіює у діапазоні 0,775–0,915; $p < 0,01$), що дозволило застосувати дисперсійний аналіз. За середніми значеннями даного показника статистично значущої різниці між досліджуваними лініями не спостерігали (рис. 1).

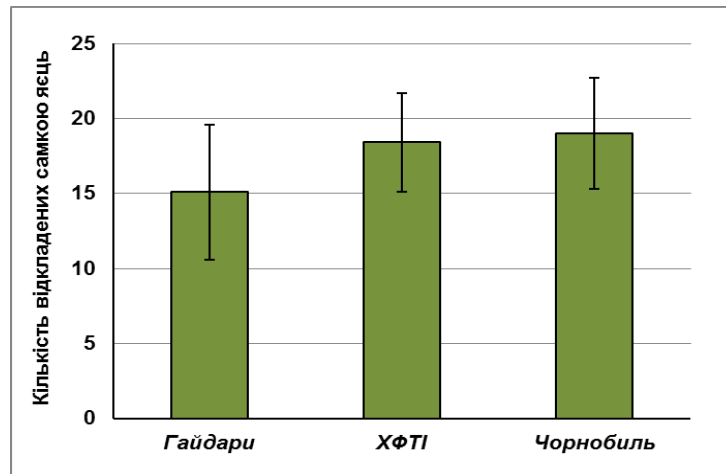
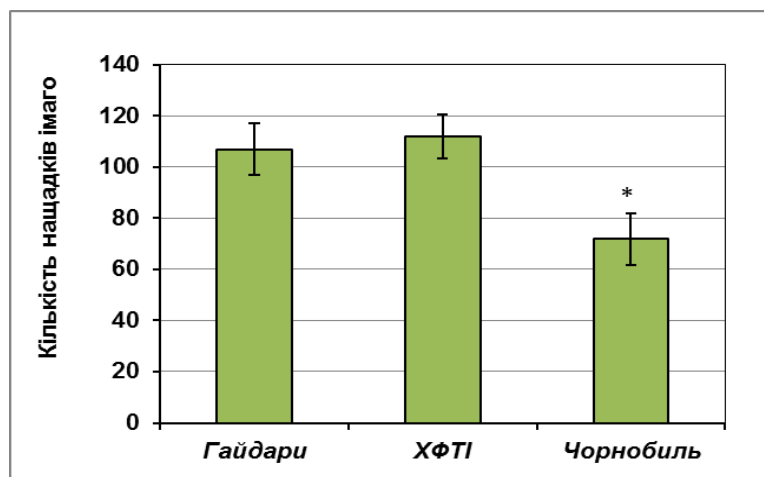


Рис. 1. Яйцепродукція самок у лініях *D. melanogaster*, отриманих з різних природних популяцій

Fig. 1. Egg production of females in *D. melanogaster* lines obtained from different natural populations



Примітка: * відмінності значущі при $p < 0,05$.
 Note: * differences are significant at $p < 0.05$.

Рис. 2. Кількість нащадків імаго в лініях *D. melanogaster*, отриманих з різних природних популяцій

Fig. 2. The number of adult offspring in *D. melanogaster* lines obtained from different natural populations

Кількість нащадків імаго – це показник, який залежить від плодючості особин батьківського покоління і виживання нащадків на преімагинальних стадіях розвитку. Показана тісна кореляція цього

показника із загальною пристосованістю організмів (Yamasaki, 1984). Тест Шапіро – Уілка показав, що розподіл значень даного показника у досліджуваних лініях відповідає нормальному закону (показник W у різних ліній варіює у діапазоні 0,902–0,984; $p < 0,05–0,01$). Згідно з результатами дисперсійного аналізу, за кількістю нащадків імаго лінії *Гайдари* і *ХФТІ* не мали між собою значних відмінностей. У той же час лінія *Чорнобиль* поступалася цим двом лініям: на 48,9% ($p < 0,05$) лінії *Гайдари* і на 57,8% ($p < 0,03$) лінії *ХФТІ* (рис. 2). Таким чином, лінія, що походить з радіаційно забрудненої території, характеризується зниженою кількістю нащадків, які досягли статевої зрілості. З огляду на наведені вище пояснення, можна констатувати, що лінія *Чорнобиль* проявляє нижчий рівень пристосованості у порівнянні з двома іншими лініями.

Смертність на преімагінальних стадіях розвитку також розглядається як компонента загальної пристосованості організмів. Ембріональна смертність розраховується як частка яєць, які не розвинулися, від загальної кількості запліднених яєць. Враховуються загальна кількість відкладених самками яєць, та яйця, які не розвинулися. Серед останніх розрізняють незапліднені прозорі яйця (рис. 3. а), ранні ембріональні леталі, які мають біле забарвлення (РЕЛ, рис. 3. б), та пізні ембріональні леталі – жовті або руді (ПЕЛ, рис. 3. в).

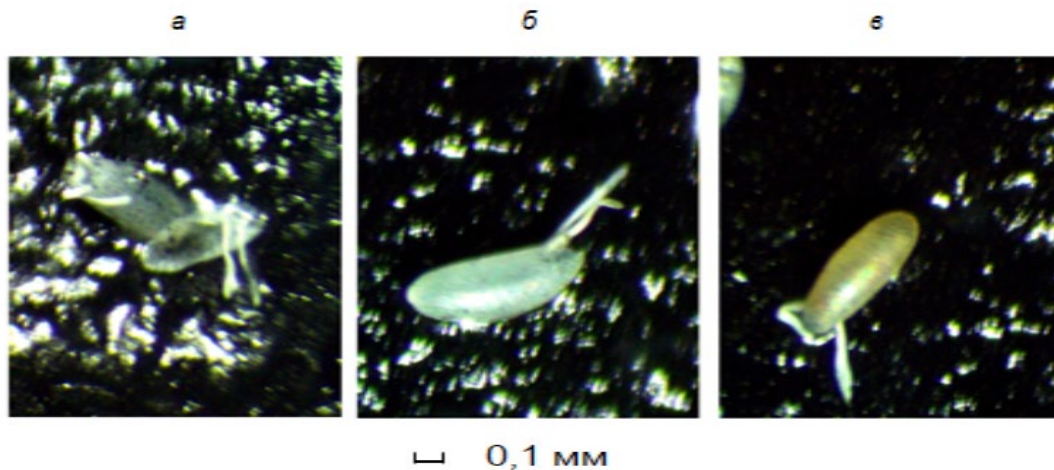
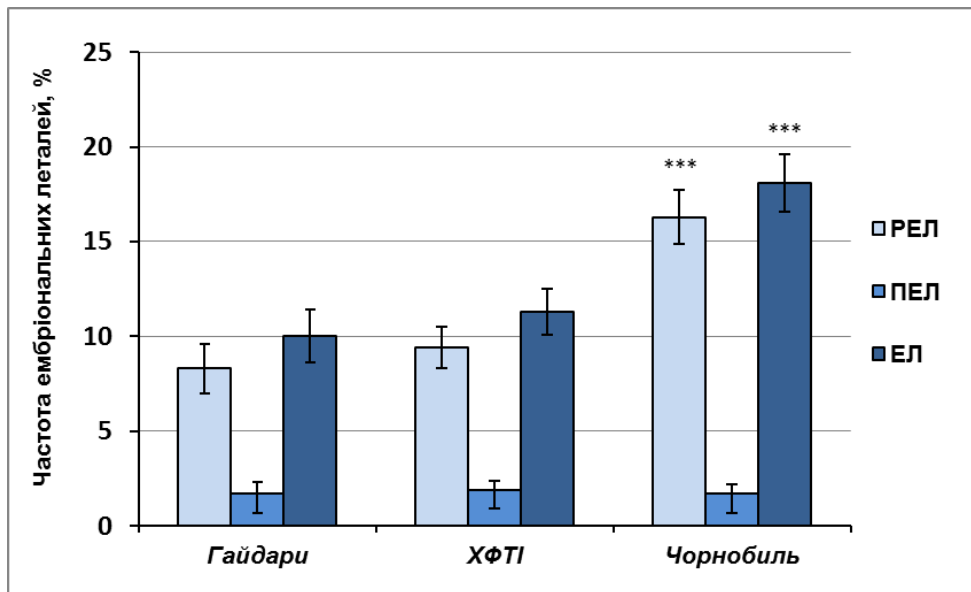


Рис. 3. Яйця *D. melanogaster*, що не розвинулися: а – незапліднені яйця; б – РЕЛ, ранні ембріональні леталі; в – ПЕЛ, пізні ембріональні леталі
Fig. 3. *D. melanogaster* eggs that have not developed: a – unfertilized eggs; b – EEL, early embryonic lethals; c – LEL, late embryonic lethals

Дані про рівні ембріональної смертності у досліджуваних лініях дрозофіли наведені на рис. 4. За частотою ранніх ембріональних леталей (РЕЛ) лінії *Гайдари* і *ХФТІ* не мали істотних відмінностей. Лінія *Чорнобиль* мала вищий рівень РЕЛ: на 96,4% ($p < 0,003$) порівняно з лінією *Гайдари* і на 73,5% ($p < 0,003$) порівняно з лінією *ХФТІ*. За частотою пізніх ембріональних леталей (ПЕЛ) жодна з ліній не вирізнялася. Сумарний рівень леталей (ЕЛ) у ліній *Гайдари* і *ХФТІ* суттєво не відрізнявся, а в лінії *Чорнобиль* цей показник був на 81,0% ($p < 0,003$) вищий, ніж в лінії *Гайдари* і на 60,1% ($p < 0,003$) вищий, ніж в лінії *ХФТІ*. Отже, більший рівень ембріональної смертності виявлено в лінії, що походить з радіаційно забрудненої території.

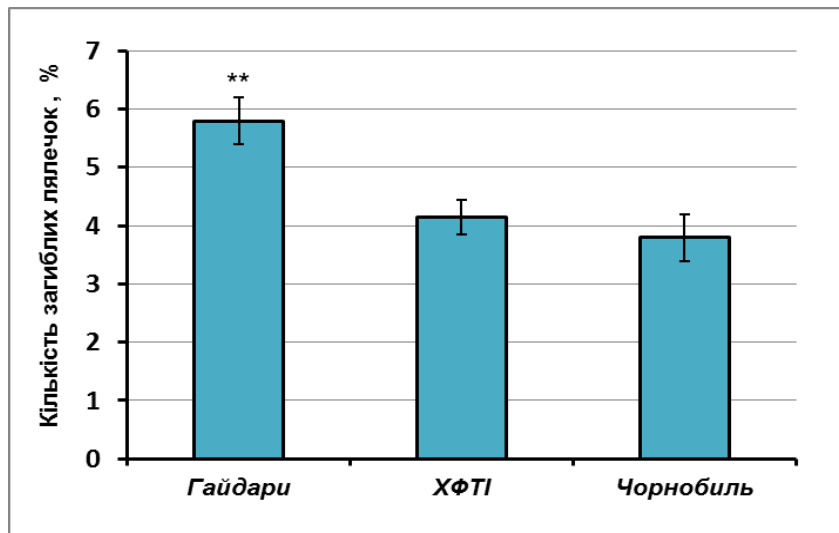
На рис. 5 представлені дані про лялечкову смертність. Лінія *Гайдари* перевершувала за цим показником дві інші лінії: лінію *ХФТІ* на 38,1% ($p < 0,03$), лінію *Чорнобиль* на 52,6% ($p < 0,003$). Значущої різниці між лініями *ХФТІ* та *Чорнобиль* не виявлено.



Примітка: *** відмінності значущі при $p < 0,003$.
 Note: *** differences are significant at $p < 0.003$.

Рис. 4. Ембріональна смертність у лініях *D. melanogaster*, отриманих з різних природних популяцій: РЕЛ – ранні ембріональні леталі, ПЕЛ – пізні ембріональні леталі, ЕЛ – сукупний рівень ембріональних леталей

Fig. 4. Embryonic mortality in *D. melanogaster* lines obtained from different natural populations: EEL – early embryonic lethality, LEL – late embryonic lethality, EL – total level of embryonic lethality



Примітка: ** відмінності значущі при $p < 0,03$.
 Note: ** differences are significant at $p < 0.03$.

Рис. 5. Лялечкова смертність у лініях *D. melanogaster*, отриманих з різних природних популяцій

Fig. 5. Pupal mortality in *D. melanogaster* lines obtained from different natural populations

Дані про компоненти пристосованості були використані для розрахунку параметрів добору у досліджуваних лініях плодових мух. Результати розрахунків наведені у табл. 1.

Як вже було сказано, за кількістю статевозрілих нащадків (показник k_{cp}) лінія *Чорнобиль* поступалася лініям *Гайдари* і *ХФТІ*. Дисперсія цього показника (σ_k^2) була найнижчою в лінії *ХФТІ* (2294,6). У лінії *Гайдари* цей показник був вищим на 29,9% (2981,2), а в лінії *Чорнобиль* – на 36,6% (3134,2). У підсумку, показник I_f , який є компонентою добору, що пов'язана з диференційною плодючістю, найвищих значень мав у лінії *Чорнобиль* (0,608), що у 2,3 рази вище, ніж у лінії *Гайдари* (0,261) і в 3,3 рази вище порівняно з лінією *ХФТІ* (0,184).

Показник диференційної смертності (I_m), об'єднує дані з ембріональної та лялечкової смертності. Слід зазначити, що значення ембріональної смертності у досліджених лініях були значно вищими, порівняно з лялечковою смертністю. У результаті, сумарна смертність (показник p_d) був досить близьким у лініях *Гайдари* і *ХФТІ* і становив, відповідно, 0,164 і 0,160. У лінії *Чорнобиль* цей показник був на рівні 0,227, тобто в 1,4 рази вищий, ніж в лініях *Гайдари* і *ХФТІ*. Як наслідок, компонента добору, пов'язана з диференційною смертністю (I_m), у лінії *Чорнобиль* була у 1,8 рази вищою у порівнянні з двома іншими лініями.

Таблиця 1. Показники добору в лініях *D. melanogaster*, отриманих з різних природних популяцій

Table 1. Selection indices in *D. melanogaster* lines obtained from different natural populations

Показники	<i>Гайдари</i>	<i>ХФТІ</i>	<i>Чорнобиль</i>
k_{cp}	106,9	111,8	71,8
k_{cp}^2	11427,6	12499,2	5155,2
σ_k^2	2981,2	2294,6	3134,2
$I_f = \sigma_k^2 / k_{cp}^2$	0,261	0,184	0,608
p_s	0,836	0,840	0,773
p_d	0,164	0,160	0,227
$I_m = p_d / p_s$	0,196	0,190	0,294
I_f / p_s	0,312	0,219	0,787
$I_{tot} = I_m + I_f / p_s$	0,508	0,409	1,081

Примітки: k_{cp} – середнє число нащадків, σ_k^2 – дисперсія числа нащадків, I_f – компонента добору, пов'язана з диференційною плодючістю, p_s – частка особин, що вижили, p_d – частка особин, які загинули, I_m – компонента добору, пов'язана з диференційною смертністю, I_{tot} – загальний індекс добору.

Notes: k_{cp} – the average number of offspring, σ_k^2 – the variance of the number of offspring, I_f – the selection component associated with differential fecundity, p_s – the proportion of surviving individuals, p_d – the proportion of individuals that died, I_m – the selection component associated with differential mortality, I_{tot} – the total selection index.

Таким чином, лінія *Чорнобиль* суттєво перевищувала лінії *Гайдари* і *ХФТІ* за обома компонентами добору – як за компонентою диференційної плодючості (I_f), так і за диференційною смертністю (I_m). У підсумку, загальні індекси добору (I_{tot}) були досить близькими в лініях *Гайдари* і *ХФТІ*: відповідно, 0,508 і 0,409. А в лінії *Чорнобиль* цей показник становив 1,081, що в 2,1–2,6 рази більше, ніж у двох інших лініях.

Таким чином, отримані результати демонструють наявність відмінностей в інтенсивності добору і його складових в лініях дрозофіли, отриманих з природних популяцій, що мешкають на територіях з різним рівнем радіаційного забруднення. Лінія *Чорнобиль*, отримана з території, забрудненої радіонуклідами, суттєво перевищує лінії *Гайдари* і *ХФТІ*, що походять з територій, на яких γ - і β -випромінювання не виходять за межі норми, як за окремими компонентами добору, так і за загальним рівнем селективного тиску.

Експерти відзначають той факт, що з плином часу екологічні наслідки радіаційного забруднення у зоні відчуження ЧАЕС виявляються меншими, ніж можна було б очікувати (WHO, 2006). Йдеться про те, що за кілька років після після основного несприятливого впливу радіації життєздатність популяцій рослин і тварин істотно відновилися в результаті комбінованих ефектів відтворення та імміграції. Вважається також, що відновленню постраждалої біоти в зоні відчуження посприяло припинення людської діяльності.

Різні автори продовжують повідомляти як про генетичні та цитогенетичні аномалії, пов'язані з дією радіації, так і про функціонування адаптаційних механізмів, що забезпечують пристосування до накопиченого внутрішнього опромінення після аварії (Møller, Mousseau, 2016; Georgieva et al., 2017).

За думкою (Møller, Mousseau, 2016), іонізуюче випромінювання може сприяти еволюції, прискорюючи еволюційні зміни. Результати нашого дослідження цілком узгоджуються з такою точкою зору. Вони свідчать про підвищений рівень смертності, знижений рівень пристосованості та посилення тиску добору в лінії плодкових мушок, яка походить з популяції, що мешкає на радіаційно забрудненій території у зоні відчуження ЧАЕС.

Отримані результати варто розглядати як попередні, такі, що потребують більших за обсягом досліджень, у тому числі із залученням матеріалу з територій з більш високими рівнями радіаційного забруднення. У той же час вони свідчать про те, що метод Кроу, який дотепер використовувався для вивчення людських популяцій, цілком може бути застосований для дослідження природних популяцій організмів, зокрема, на територіях, що зазнають істотного антропогенного впливу.

Список літератури / References

- Козерецька І.А., Проценко А.В., Афанасьєва Е.С. и др. (2008). Мутаційні процеси в природних популяціях *Drosophila* и *Hirundo rustica* с радіаційно забруднених територій України. *Цитологія и генетика*, 42(4), 63–68. [Kozeretska I.A., Protsenko A.V., Afanasieva K.S. et al. (2008). Mutation processes in the natural populations of *Drosophila* and *Hirundo rustica* from Ukrainian radiation contaminated territories. *Cytology and Genetics*, 42(4), 63–68.] (in Russian)
- Костенко В.В., Филипоненко Н.С., Волкова Н.Е., Вороб'єва Л.І. (2008). Изучение пологового поведения линий *Drosophila melanogaster*, из природных популяций с различным уровнем радиационного заражения. *Дрозофіла у експериментальній генетиці та біології*. Зб. наук. праць I Міжнар. конф. Харків: ХНУ, 79–81. [Kostenko V.V., Filiponenko N.S., Volkova N.E., Vorob'eva L.I. (2008). Study of sexual behavior of *Drosophila melanogaster* lines from natural populations with different levels of radiation contamination. *Drosophila in Experimental Genetics and Biology*, Collection of Sci. Papers of the 1st Internat. Conf. Kharkiv: KhNU, 79–81.] (in Russian)
- Проценко А.В., Козерецька І.А., Фуллер Б.А. и др. (2008). Репродуктивный успех *Drosophila melanogaster* в природных популяциях с радиационно загрязненных территорий Украины. *Дрозофіла у експериментальній генетиці та біології*. Зб. наук. праць I Міжнар. конф. Харків: ХНУ, 89–91. [Protsenko A.V., Kozeretska I.A., Fuller B.A. et al. (2008). Reproductive success of *Drosophila melanogaster* in natural populations from radiation-contaminated areas of Ukraine. *Drosophila in Experimental Genetics and Biology*, Collection of Sci. Papers of the 1st Internat. Conf. Kharkiv: KhNU, 89–91.] (in Russian)
- Тихомирова М.М. (1990). Генетический анализ. Ленинград: Изд-во ЛГУ. 280 с. [Tikhomirova M.M. (1990). Genetic analysis. Leningrad: Leningrad State University Publishing House. 280 p.] (in Russian)
- Филипоненко Н.С., Волкова Н.Е., Костенко В.В. и др. (2008). Исследование компонентов приспособленности линий *Drosophila melanogaster*, полученных из природных популяций с территорий с различным уровнем радиационного загрязнения. *Дрозофіла у експериментальній генетиці та біології*. Зб. наук. праць I Міжнар. конф. Харків: ХНУ, 98–101. [Filiponenko N.S., Volkova N.E., Kostenko V.V. et al. (2008). Study of fitness components of *Drosophila melanogaster* lines obtained from natural populations from areas with different levels of radiation pollution. *Drosophila in Experimental Genetics and Biology*, Collection of Sci. Papers of the 1st Internat. Conf. Kharkiv: KhNU, 98–101.] (in Russian)
- Якимчук Р.А. (2018). Ефективність використання мутацій, індукованих на радіаційно забруднених територіях, при поліпшенні сортів озимої пшениці. *Фактори експериментальної еволюції організмів*, 23, 170–175. [Yakymchuk R.A. (2018). Efficiency of the use of mutations, induced on radiation-contaminated areas, when improving winter wheat cultivars. *Factors in Experimental Evolution of Organisms*, 23, 170–175.] <https://doi.org/10.7124/FEEO.v23.1009> (in Ukrainian)
- Alexander M., Bergendahl J. (1964). Dose rate effects in the developing germ cells of male *Drosophila*. *Genetics*, 49, 1–16.
- Atramentova L.A., Meshcheryakova I.P., Filiptsova O.V. (2013). Reproductive characteristics and the Crow's index in different populations of Eupatoria. *Russian Journal of Genetics*, 49, 1219–1226. <https://doi.org/10.1134/S1022795413110033>
- Baba M. (2013). Fukushima accident: what happened? *Radiation Measurements*, 55, 17–21. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2013.01.013>
- Crow J.F. (1958). Some possibilities for measuring selection intensities in man. *Human Biology*, 30, 1–13.

- Einor D., Bonisoli-Alquati A., Costantini D. et al. (2016). Ionizing radiation, antioxidant response and oxidative damage: a meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 548–549, 463–471. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.027>
- Garnier-Laplace J., Geras'kin S., Della-Vedova C. et al. (2013). Are radiosensitivity data derived from natural field conditions consistent with data from controlled exposures? A case study of Chernobyl wildlife chronically exposed to low dose rates. *Journal of Environmental Radioactivity*, 121, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.01.013>
- Georgieva M., Rashydov N.M., Hajduch M. (2017). DNA damage, repair monitoring and epigenetic DNA methylation changes in seedlings of Chernobyl soybeans. *DNA Repair*, 50, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.dnarep.2016.12.002>
- Golub N.Ia., Chernyk Ia.I. (2008). Mutations induced by X-ray irradiation and certain chemical reagents that alter the life span of *Drosophila melanogaster*. *Cytology and Genetics*, 42, 30–36. <https://doi.org/10.3103/S0095452708010052>
- Guerrero-Bosagna C., Weeks S., Skinner M.K. (2014). Identification of genomic features in environmentally induced epigenetic transgenerational inherited sperm epimutations. *Plos One*. 9(6), e100194. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100194>
- Kivisaari K., Boratynski Z., Lavrinienko A. et al. (2020). The effect of chronic low-dose environmental radiation on organ mass of bank voles in the Chernobyl exclusion zone. *International Journal of Radiation Biology*, 96(10), 1254–1262. <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1793016>
- Kozak N., Atramentova L. (2021). Indexes of natural selection, migration and reproductive characteristics in Lutsk population, West Ukraine. *EJ-DEVELOP, European Journal of Development Studies*, 1(3), 59–64. <https://doi.org/10.24018/ejdevelop.2021.1.3.41>
- Mothersill C., Abend M., Brechignac F. et al. (2019). The tubercular badger and the uncertain curve:- the need for a multiple stressor approach in environmental radiation protection. *Environmental Research*, 168, 130–140. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.09.031>
- Møller A.P., Mousseau T.A. (2016). Are organisms adapting to ionizing radiation at Chernobyl? *Trends in Ecology & Evolution*, 31, 281–289, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2016.01.005>
- Murakami M., Ohte N., Suzuki T. et al. (2015). Biological proliferation of cesium-137 through the detrital food chain in a forest ecosystem in Japan. *Scientific Reports*, 4(1), 1–5. <https://doi.org/10.1038/srep03599>
- Skorobagatko D.A., Mazilov A.A., Strashnyuk V.Yu. (2020). Endoreduplication in *Drosophila melanogaster* progeny after exposure to acute γ -irradiation. *Radiation and Environmental Biophysics*, 59(2), 211–220. <https://doi.org/10.1007/s00411-019-00828-8>
- Vaiserman A.M. (2011). Hormesis and epigenetics: Is there a link? *Ageing Research Reviews*, 10, 413–421. <https://doi.org/10.1016/j.arr.2011.01.004>
- WHO. (2006). Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience. *Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Environment"*. IAEA. Vienna. 180 p.
- Yamasaki T. (1984). Measurement of fitness and its components in six laboratory strains of *Drosophila melanogaster*. *Genetics*, 108, 201–211.

Selection parameters in lines of *Drosophila melanogaster* Meig., obtained from populations living in territories with different levels of radiation pollution: approbation of the Crow's method

M.D. Lukianov, A.S. Zlatiev, E.V. Vakulenko, D.A. Skorobagatko, A.A. Mazilov, V.Yu. Strashnyuk

Man-made disasters, such as the accidents at the Chornobyl NPP and the Fukushima NPP-1, have raised questions about the radiation risks associated with the use of atomic energy in a new and acute way. The purpose of the study was to investigate the features of the action of natural selection in the lines of *Drosophila melanogaster* Meig., obtained from natural populations living in territories with different levels of radiation pollution. One of the aims was to test Crow's method on a model object, such as *Drosophila*. This method makes it possible to estimate the total intensity of selection, as well as to determine the contribution of its individual components, such as differential fecundity and differential mortality. The study was carried out on three lines of *Drosophila melanogaster* Meig.: the *Haidary* line (radiation background in the territory from which the line originates: 0.12 μ Sv/h, β -radiation flux: 0 particles/cm²/min), the *KhPTI* line (radiation background: 0.12–0.20 μ Sv/h, β -radiation flux: 0 particles/cm²/min), the *Chornobyl* line (radiation background: 0.20–0.22 μ Sv/h, β -radiation flux: 7–8 particles/cm²/min). According to the obtained results, the lines did not differ among themselves in egg production of females. In terms of the number of adult offspring, the *Chornobyl* line was inferior to the *Haidary* and *KhPTI* lines by 48.9% and 57.8%, respectively. Mortality in the pre-reproductive period

of development (indicator p_d), which includes embryonic and pupal mortality, was the highest in the *Chornobyl* line and exceeded the p_d value in the *Haidary* and *KhPTI* lines by 1.4 times. As a result, the *Chornobyl* line, obtained from the territory contaminated with radionuclides, significantly exceeded the *Haidary* and *KhPTI* lines, obtained from the territories where the radiation situation does not go beyond the norm, by both components of selection – both by the component of differential fecundity (I_f), and by differential mortality (I_m). The total selection indices (I_{tot}) were quite close in the *Haidary* and *KhPTI* lines, and in the *Chornobyl* line this index was 2,1–2,6 times higher than in the other two lines. The results of the study support the view that ionizing radiation can promote evolution by accelerating evolutionary change. They indicate an increased mortality rate, a reduced level of fitness and an increased selection pressure in the line of fruit flies, which originates from the population living in the radiation-contaminated territory in the Chornobyl exclusion zone.

Key words: γ -radiation, β -radiation, fecundity, embryonic mortality, pupal mortality, selection indices.

Cite this article: Lukianov M.D., Zlatiev A.S., Vakulenko E.V., Skorobagatko D.A., Mazilov A.A., Strashnyuk V.Yu. Selection parameters in lines of *Drosophila melanogaster* Meig., obtained from populations living in territories with different levels of radiation pollution: approbation of the Crow method. *The Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Biology"*, 2023, 41, 41–50. <https://doi.org/10.26565/2075-5457-2023-41-4> (in Ukrainian)

About the authors:

M.D. Lukianov – V.N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq., 4, Kharkiv, 61022, Ukraine, mike.gessen@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-0992-3538>

A.S. Zlatiev – V.N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq., 4, Kharkiv, 61022, Ukraine, fantom9531@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-1028-9628>

E.V. Vakulenko – V.N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq., 4, Kharkiv, 61022, Ukraine, vakulenkoevgenij353@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-8647-8949>

D.A. Skorobagatko – NSC 'Kharkiv Institute of Physics and Technology', Academichna str., 1, Kharkiv, Ukraine, 61108, d.skorobagatko86@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3239-9004>

A.A. Mazilov – NSC 'Kharkiv Institute of Physics and Technology', Academichna str., 1, Kharkiv, 61108, Ukraine, alexey.mazilov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7688-1527>

V.Yu. Strashnyuk – V.N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq., 4, Kharkiv, 61022, Ukraine; Institute of Plant Physiology and Genetics, Bulgarian Academy of Sciences, Acad. G. Bonchev str., Bldg. 21, Sofia, 1113, Bulgaria, volodymyr.strashnyuk@karazin.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8343-866X>

Received: 16.07.2023 / Revised: 23.10.2023 / Accepted: 22.11.2023