

UDC 582.28:504.5

DOI: 10.58407/bht.3.24.3



Copyright (c) 2024 Dariia Liubchykova, Pavlo Nahorny, Valentyn Dedovych, Yurii Diatlov, Oleksandr Tretiak  
Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Дарія Любчикова, Павло Нагорний, Валентин Дедович,  
Юрій Дятлов, Олександр Третяк

## МУТАГЕННИЙ ВПЛИВ НАНОЧАСТИНОК НІКЕЛЮ, СИЛІЦІЮ, ТИТАНУ НА ОНТОГЕНЕЗ *DROSOPHILA MELANOGASTER*



Dariia Liubchykova, Pavlo Nahorny, Valentyn Dedovych,  
Yurii Diatlov, Oleksandr Tretiak

## MUTAGENIC INFLUENCE OF NANOPARTICLES OF NICKEL, SILICON, TITANIUM ON ONTOGENESIS *DROSOPHILA MELANOGASTER*

### АНОТАЦІЯ

**Мета роботи.** Дослідження мутагенного впливу різних концентрацій наночастинок титану, нікелю та силіцію на онтогенез *Drosophila melanogaster* (*D. melanogaster*) ліній *Canton S* і *Ebony*.

**Методологія.** Дослідження проводилося шляхом приготування поживного середовища для *D. Melanogaster* з додаванням наночастинок титану, силіцію, нікелю; схрещенням у даному середовищі експериментальної вибірки комах чистих ліній *Ebony* і *Canton S*, та подальшим обліком змін фенотипу в особин першого та другого поколінь. Приготування поживного середовища здійснювалося за методикою Yaschenko et al (2023). Для обробки кількісних даних обліку фенотипових проявів мутацій використано методи описової статистики, непараметричний U-критерій Манна-Уїтні, методи графічної візуалізації даних.

**Наукова новизна.** Вперше схарактеризовано мутагенну активність наночастинок титану, нікелю, силіцію у концентраціях 0,1 мг/см<sup>3</sup> і 0,01 мг/см<sup>3</sup> на прикладі індукованих мутацій у експериментальній вибірці особин *D. melanogaster* чистих ліній *Canton S* і *Ebony*, та їх нащадків першого і другого поколінь.

**Висновки.** Виявлено, що наночастинок титану призводять до виникнення мутацій як у концентрації 0,1 мг/см<sup>3</sup> (14,8 % мутантних особин у першому поколінні та 19,8 % у другому поколінні), так і в концентрації 0,01 мг/см<sup>3</sup> (4,3 % у першому поколінні та 3,7 % у другому). Водночас наночастинок силіцію і нікелю демонструють мутагенну активність лише за більших концентрацій (0,1 мг/см<sup>3</sup>). Серед піддослідних особин, які розвивалися у середовищі з концентраціями 0,01 мг/см<sup>3</sup> наночастинок нікелю і силіцію, фенотипових ознак мутацій не виявлено. Проаналізовано також певні відмінності мутагенезу у вибірках особин ліній *Ebony* та *Canton S*, які пов'язані з впливом досліджуваних речовин на клітинні системи репарації *D. melanogaster*. За підсумками дослідження обґрунтовано практичну недоцільність використання наночастинок титану у фармакологічних цілях, а також необхідність подальшого ґрунтовного дослідження можливості медичного та фармакологічного застосування наночастинок силіцію та нікелю.

**Ключові слова:** наночастинок, нікель, титан, силіцій, мутації, *Drosophila melanogaster*

### ABSTRACT

**Objective.** Research of the mutagenic effect of various concentrations of nanoparticles of titanium, nickel and silicon on the ontogenesis of *Drosophila melanogaster* (*D. melanogaster*) *Canton S* and *Ebony* lines.

**Methodology.** The study was conducted by preparing a nutrient medium for *D. melanogaster* with the addition of nanoparticles of titanium, silicon, and nickel; crossing in this environment an experimental sample of insects of the pure lines *Ebony* and *Canton S*, and further accounting for phenotype changes in individuals of the first and second generations. Preparation of nutrient medium was carried out according to the method of Yaschenko et al (2023). Methods of descriptive statistics, non-parametric Mann-Whitney U-test, methods of graphic visualization of data were used to process quantitative data of accounting for phenotypic manifestations of mutations.

**Scientific novelty.** For the first time, the mutagenic activity of nanoparticles of titanium, nickel, and silicon in concentrations of 0.1 mg/cm<sup>3</sup> and 0.01 mg/cm<sup>3</sup> was characterized on the example of induced mutations in an experimental sample of *D. melanogaster* pure lines *Canton S* and *Ebony*, and their descendants of the first and second generations.

**Conclusions.** It was found that titanium nanoparticles lead to mutations both at a concentration of 0.1 mg/cm<sup>3</sup> (14.8 % of mutant individuals in the first generation and 19.8 % in the second generation) and at a concentration of 0.01 mg/cm<sup>3</sup> (4.3 % in the first generation and 3.7 % in the second). At the same time, silicon and nickel nanoparticles demonstrate mutagenic activity only at higher concentrations (0.1 mg/cm<sup>3</sup>). No phenotypic signs of mutations were detected among the experimental individuals that developed in an environment with concentrations of 0.01 mg/cm<sup>3</sup> of nickel and silicon nanoparticles. Certain differences in mutagenesis in the samples of individuals of the *Ebony* and *Canton S* lines, which are related to the influence of the studied substances on cellular repair systems of *D. melanogaster*, were also analyzed. Based on the results of the research, the practical impracticability of using titanium nanoparticles for pharmacological purposes was substantiated, as well as the need for further thorough research into the possibility of medical and pharmacological use of silicon and nickel nanoparticles.

**Key words:** nanoparticles, nickel, titanium, silicon, mutations, *Drosophila melanogaster*

## Постановка проблеми

На сучасному етапі розвитку біотехнологій все більшого значення починають відігравати препарати, засновані на специфічній дії наночастинок (Trakhtenberh, 2013). Так, досить успішно з бактерицидною метою використовуються наноконплеси ZnO (Androshchuk et al., 2017). Інший приклад: наночастинок Si мають виражену кардіо-протекторну дію (Pedan & Tymchenko, 2014). Протигрипозну активність виявляють також наноструктури TiO<sub>2</sub> (Moskalenko et al., 2009). Загалом, сфера застосування наночастинок досить широка, визначається їх природою та відповідними фізико-хімічними властивостями. У науці в якості наночастинок традиційно розглядаються часточки певної речовини, геометричні розміри яких не перевищують 100 нм за кожним з фізичних вимірів. Такі надзвичайно малі розміри часточок речовини надають їм зовсім інших, особливих властивостей. Наночастинок з легкістю проникають скрізь мембрани дихальних шляхів, шлунково-кишкового тракту (Androshchuk et al., 2017). Результати окремих досліджень свідчать, що наночастинок навіть долають плацентарний бар'єр, можуть досягати ядра клітин. Проте можливість контакту наночастинок з генетичним матеріалом клітин обумовлює невизначеність їх мутагенного впливу (Selivon M. et al., 2012; Solodovnyuk et al., 2011). Саме тому можливість використання наночастинок певної речовини для медико-фармакологічних цілей напряму залежить від вираженості їх мутагенної дії.

Певний потенціал фармакологічного використання мають наночастинок нікелю, титану, силіцію. Проте їх мутагенна активність залишається майже недослідженою. Відповідно метою даного дослідження було виявлення інтенсивності мутагенної дії

різних концентрацій відповідних наноструктур. У якості тест-об'єктів обрано чисті лінії *Drosophila melanogaster* (*D. melanogaster*), враховуючи ґрунтовний рівень дослідження геному та можливих мутацій, а також легкість розведення даних комах (Protsenko & Kozeretska, 2006; Protsenko, 2019).

## Матеріали та методи досліджень

Дослідження проводилися протягом червня – грудня 2023 року та травня – вересня 2024 року на базі лабораторії генетики кафедри біології Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка. Для експерименту було взято близько 2100 статевозрілих особин чистих ліній *Ebony* та *Canton S D. melanogaster* з доміантними проявами ознак кольору очей, форми крил, забарвлення тіла. З метою виявлення фенотипових проявів мутагенної дії наночастинок нікелю, силіцію, титану здійснювався аналіз представників поколінь F1 та F2 при схрещуванні в поживному середовищі за умови додавання досліджуваних речовин. Досліджувався мутагенний вплив концентрацій наночастинок 0,01 мг/см<sup>3</sup> та 0,1 мг/см<sup>3</sup>. Для вирізнення мутаційних змін фенотипу від модифікаційних було виокремлено контрольну групу особин *D. melanogaster*, які схрещувалися в середовищі без додавання наночастинок. В якості поживного середовища використано стандартний цукрово-дріжджовий розчин (Yaschenko et al., 2023). Задля схрещування особин у флакон з поживним середовищем розміщувалися 5 самців та 5 незайманих самок та утримувалися в ньому протягом 5 діб, що цілком достатньо для відкладання яєць. Підрахунок фенотипових змін здійснювався на 3 добу після виходу імаго. Для обліку мутацій досліджуваних комах наркотизували (Pedan & Tymchenko, 2014). Отримані дані щодо кількості виявлених

фенотипових змін статистично обробляли за допомогою описових методів статистики та графічних методів представлення даних.

### Результати та їх обговорення

Під час проведеного експериментального дослідження було виявлено низку

мутацій в особин першого та другого поколінь. Окремо розглядалися мутації в *D. melanogaster* ліній *Canton S* та *Ebony*. Кількісні дані щодо фенотипових проявів виявлених мутацій у комах лінії *Canton S* представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Виявлені мутації у досліджуваних особин *D. melanogaster* лінії *Canton S* першого та другого поколінь

| Речовина, концентрація      | Кількість особин в першому поколінні | Кількість мутацій в першому поколінні | Кількість особин в другому поколінні | Кількість мутацій в другому поколінні |
|-----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Ti, 0,1 мг/см <sup>3</sup>  | 203                                  | 32 ♀ і 14 ♂ (2,3,4)*                  | 239                                  | 33 ♀ і 18 ♂ (2,3)                     |
| Ti, 0,01 мг/см <sup>3</sup> | 56                                   | 3 ♀ (3)                               | 71                                   | 3 ♀ (3)                               |
| Ni, 0,1 мг/см <sup>3</sup>  | 85                                   | 16 ♀ і 12 ♂ (2,4)                     | 136                                  | 8 ♀ і 6 ♂ (2,4)                       |
| Ni, 0,01 мг/см <sup>3</sup> | 39                                   | ---                                   | 68                                   | ---                                   |
| Si, 0,1 мг/см <sup>3</sup>  | 34                                   | 5 ♀ і 1 ♂ (1)                         | 64                                   | 8 ♀ і 4 ♂ (1)                         |
| Si, 0,01 мг/см <sup>3</sup> | 51                                   | ---                                   | 84                                   | ---                                   |
| Контроль                    | 77                                   | ---                                   | 125                                  | ---                                   |

Примітка: \* тут і далі введено наступні позначення виявлених змін фенотипу: 1 – відсутність забарвлення; 2 – надлишкові антени; 3 – редуковані крила; 4 – видовжений хоботок

Отримані кількісні дані свідчать про наявність мутагенної дії досліджуваних наночастинок на онтогенез *D. melanogaster* лінії *Canton S*, причому вираженість та форма прояву мутагенного ефекту залежить від конкретної речовини та її концентрації. За низьких концентрацій певних наночастинок змін фенотипу піддослідних комах не виявлено взагалі. Водночас за концентрації 0,1 мг/см<sup>3</sup> мутації виявляються як у першому, так і у другому поколіннях для всіх трьох досліджуваних речовин.

Можемо бачити, що в контрольній групі фенотипових змін не виявлено ані в першому, ані в другому поколіннях. Відповідно можна стверджувати, що дослідне середовище не має інших факторів впливу на фенотип *D. melanogaster*, окрім як наночастинки нікелю, силіцію, титану. Відповідно виявлені зміни фенотипу є проявами мутацій, а не модифікацій.

Найбільш виражену мутагенну активність мають наночастинки титану, які навіть у малих концентраціях призводять до появи певних фенотипових змін в окремих особин досліджуваної вибірки *D. melanogaster* лінії *Canton S*. Водночас за більших концентрацій титану (0,1 мг/см<sup>3</sup>) мутації виявляються вже у

22,7 % особин першого покоління та у 21,3 % другого покоління. Найбільш поширений фенотиповий прояв мутацій *D. melanogaster* лінії *Canton S*, спричинених дією наночастинок титану – редуковані крила. Проте зустрічаються також такі зміни фенотипу: надлишкові антени, видовжений хоботок.

Мутагенний вплив наночастинок нікелю та силіцію є менш вираженим. При концентрації 0,01 мг/см<sup>3</sup> відповідних речовин зміни фенотипу в особин першого та другого поколінь взагалі не виявлені. Проте за наявності концентрації 0,1 мг/см<sup>3</sup> частка мутантних особин суттєво зростає: 32,9 % у першому поколінні та 10,3 % у другому (нікель), 17,6 % у першому поколінні та 18,8 % у другому (силіцій). Найпоширеніші зміни фенотипу *D. melanogaster* лінії *Canton S*, викликані мутагенним ефектом нікелю: надлишкові антени, видовжений хоботок. Серед фенотипових змін особин, які зазнавали впливу наночастинок силіцію, виявлено лише відсутність забарвлення.

На рисунку 1 наведено графічне зображення частки мутантних особин серед піддослідних комах лінії *Canton S* першого та другого поколінь.

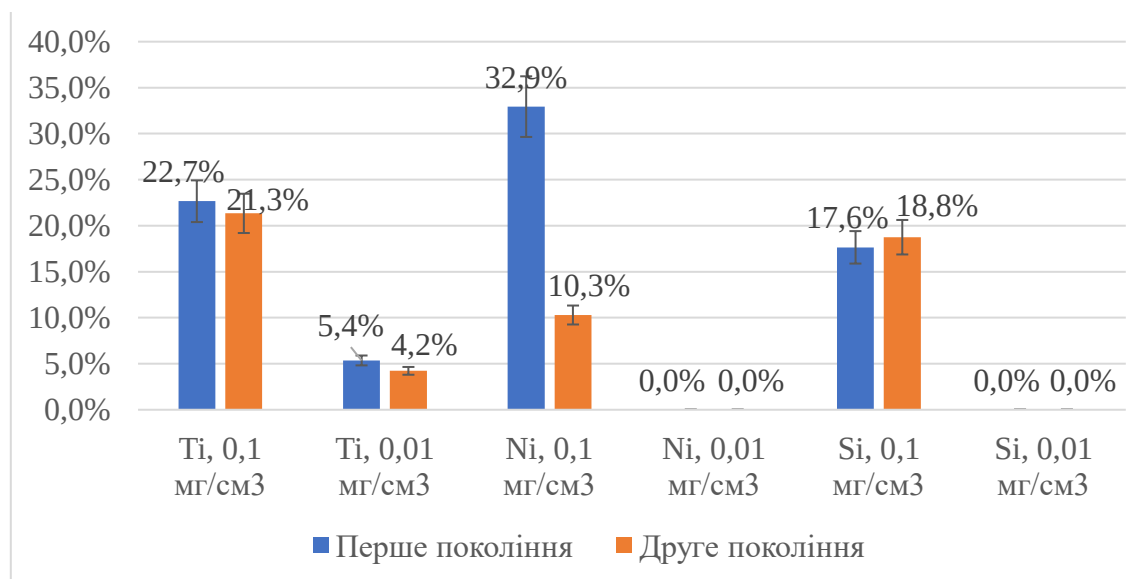


Рис. 1. Відносні показники виявлених мутацій у досліджуваних комах *D. melanogaster* лінії *Canton S* першого та другого покоління

На окрему увагу заслуговує аналіз залежності мутагенного впливу наночастинок титану, нікелю, силіцію на особин *D. melanogaster* лінії *Canton S* залежно від їх статі. Порівняння чисельних показників мутацій у самців та самок дозволяє зробити припущення про їх статистично обґрунтовану нерівнозначність. Дана гіпотеза була статистично підтверджена за допомогою непараметричного U-критерія Манна-Уїтні. Отже, частота фенотипових проявів мутацій у особин чоловічої та жіночої статей не однакова. Водночас можемо спостерігати статистично достовірну меншу частку особин чоловічої статі в першому та другому поколіннях за умови дії досліджуваних наночастинок. Саме тому можна припустити, що мутагенний ефект відповідних наноструктур є більш летальним саме для особин чоловічої статі. Враховуючи особливості генетичного обумовлення статі у комах *D. melanogaster* (стать особини залежить від кількості X-хромосом – Syvolob et al., 2018), цілком ймовірно, що виявлені мутації локалізуються в X-хромосомі та призводять до синтезу дефектних білків. Якщо ж кількість X-хромосом більша ніж 1 (особини жіночої статі), летальний ефект мутацій зменшується внаслідок наявності неушкодженої X-хромосоми.

Схожі кількісні показники фенотипових змін виявлено у піддослідних особин *D. mela-*

*nogaster* лінії *Ebony*. В таблиці 2 систематизовано відповідні дані для концентрацій 0,1 мг/см³ та 0,01 мг/см³ досліджуваних наночастинок.

Аналізуючи отримані кількісні дані щодо виявлених фенотипових проявів мутацій у комах *D. melanogaster* лінії *Ebony* можемо зробити наступні узагальнення.

Як і у випадку лінії *Canton S*, у контрольній групі не виявлено змін фенотипу ані у першому, ані в другому поколінні. Відповідно саме поживне середовище (без додавання наночастинок) не містить факторів модифікаційної та мутаційної мінливості, а виявлені фенотипові зміни є ознаками мутацій, спричинених додаванням досліджуваних речовин.

Найбільший мутагенний ефект виявляють наночастинок титану, присутність яких у поживному середовищі обумовлює наявність мутацій у першому та другому поколіннях *D. melanogaster* лінії *Ebony* як для менших (0,1 мг/см³), так і для більших концентрацій (0,01 мг/см³). Фенотипові ознаки відповідних мутацій мають схожий вияв як і у випадку змін, зафіксованих при дослідженні комах лінії *Canton S*: редуковані крила (найбільша частка серед виявлених фенотипових проявів мутацій), надлишкові антени, видовжений хоботок.

Таблиця 2

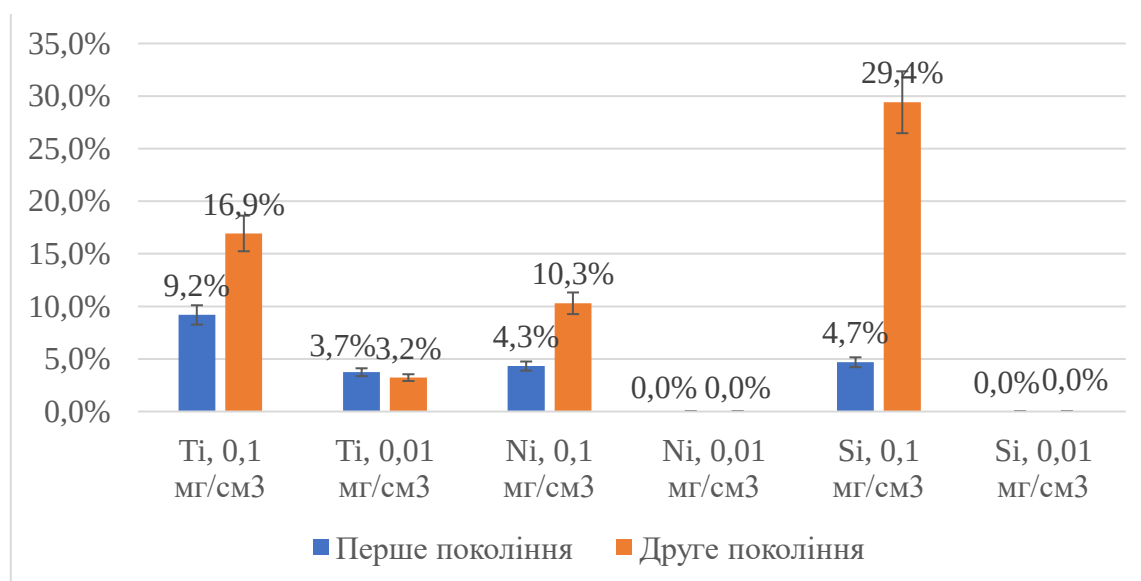
**Виявлені мутації у досліджуваних особин *D. melanogaster* лінії *Ebony* першого та другого покоління**

| Речовина, концентрація      | Кількість особин в першому поколінні | Кількість мутацій в першому поколінні | Кількість особин в другому поколінні | Кількість мутацій в другому поколінні |
|-----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Ti, 0,1 мг/см <sup>3</sup>  | 283                                  | 22 ♀ і 4 ♂ (2,3)                      | 124                                  | 13 ♀ і 8 ♂ (2,3,4)                    |
| Ti, 0,01 мг/см <sup>3</sup> | 107                                  | 4 ♀ (3)                               | 62                                   | 2 ♀ (2,3)                             |
| Ni, 0,1 мг/см <sup>3</sup>  | 185                                  | 6 ♀ і 2 ♂ (2)                         | 136                                  | 11 ♀ і 3 ♂ (2)                        |
| Ni, 0,01 мг/см <sup>3</sup> | 59                                   | ---                                   | 18                                   | ---                                   |
| Si, 0,1 мг/см <sup>3</sup>  | 64                                   | 2 ♀ і 1 ♂ (1)                         | 34                                   | 6 ♀ і 4 ♂ (1)                         |
| Si, 0,01 мг/см <sup>3</sup> | 61                                   | ---                                   | 34                                   | ---                                   |
| Контроль                    | 177                                  | ---                                   | 135                                  | ---                                   |

Мутагенний вплив наночастинок нікелю та силіцію за малих концентрацій (0,01 мг/см<sup>3</sup>) на піддослідних особин лінії *Ebony* не виявлений. Водночас за присутності в поживному середовищі відповідних наноструктур у концентрації 0,1 мг/см<sup>3</sup> зафіксовано певний відсоток фенотипових ознак мутацій. Так, наявність наночастинок нікелю у концентрації 0,1 мг/см<sup>3</sup> призвела до появи 3,7 % мутантних особин у першому поколінні та 3,2 % мутантних особин у другому. Наявність наночастинок силіцію у

концентрації 0,1 мг/см<sup>3</sup> призвела до появи 4,7 % мутантних особин у першому поколінні та 15,6 % мутантних особин у другому. Фенотипові прояви мутацій аналогічні як і у досліджуваних особин *D. melanogaster* лінії *Canton S*: надлишкові антени (нікель), відсутність забарвлення (силіцій).

На рисунку 2 наведено графічне зображення частки мутантних особин серед досліджуваних модельних об'єктів лінії *Ebony* першого та другого покоління.



**Рис. 2. Відносні показники виявлених мутацій у досліджуваних особин *D. melanogaster* лінії *Ebony* першого та другого покоління**

Порівнюючи отримані відносні показники виявлених мутацій у піддослідних комах ліній *Canton S* та *Ebony* першого і другого поколінь можемо помітити переважно менший відсоток мутацій у комах лінії *Ebony*. Використання непараметричного статистичного U-критерія Манна-Уїтні також підтверджує відмінність у кількості мутантних особин в обох досліджуваних лініях. Таким чином, можна припустити, що мутагенний ефект досліджуваних наночастинок меншою мірою виражений на комах лінії *Ebony*. Ґрунтовний порівняльний аналіз генетичних карт *D. melanogaster* ліній *Canton S* та *Ebony* дозволить більш точно локалізувати можливі мутаційні зміни генотипів комах за дії наночастинок нікелю, силіцію, титану. Інше важливе спостереження: у комах лінії *Ebony* частка мутацій у другому поколінні є рівною або більшою для всіх аналізованих концентрацій наночастинок. Відповідно системи репарації особин даної лінії, на відміну від *D. melanogaster* лінії *Canton S*, не індукуються в ході розвитку в поживному середовищі з додаванням досліджуваних наночастинок.

Таким чином, можна зробити висновок, що всі три досліджувані класи наночастинок проявляють тією чи іншою мірою мутагенну активність при додавання у поживне середовище. Водночас такий мутагенний вплив напряду залежить від концентрації відповідної речовини. Так, присутність наночастинок титану як у концентрації 0,01 мг/см<sup>3</sup>, так і в концентрації 0,1 мг/см<sup>3</sup> призводить до виникнення змін фенотипу в обох досліджуваних лініях у першому та другому поколінні. Тому мутагенна активність таких наночастинок є досить значною, а отже перспективи їх фармакологічного застосування вкрай обмежені. Водночас додавання наночастинок силіцію та нікелю в невеликих концентраціях (0,01 мг/см<sup>3</sup>) не призвело до появи фенотипових проявів мутаціях у жодної особини *D. melanogaster*

ліній *Canton S* та *Ebony*. З іншого боку, вірогідна наявність певного летального ефекту даних наночастинок у згаданих концентраціях у піддослідних комах. Тому можливість та доцільність використання наночастинок силіцію та нікелю у фармакологічних цілях має досліджуватися більш ґрунтовно.

### Висновки

За результатами проведеного дослідження виявлено мутагенний вплив наночастинок нікелю, титану і силіцію на експериментальні популяції *D. melanogaster* чистих ліній *Ebony* і *Canton S*. Встановлено, що наночастинки титану проявляють мутагенну активність як у концентрації 0,1 мг/см<sup>3</sup> так і в концентрації 0,01 мг/см<sup>3</sup>. Основні фенотипові прояви зазначених мутацій: надлишкові антени, редуковані крила, видовжений хоботок. Наночастинки нікелю призводять до появи мутацій у формі надлишкових антен і видовженого хоботку в обох піддослідних популяціях лише в концентрації 0,1 мг/см<sup>3</sup>. Наночастинки силіцію виявляють мутагенну активність, що призводить до відсутності забарвлення в окремих особин обох досліджуваних ліній, так само лише в концентрації 0,1 мг/см<sup>3</sup>. За концентрацій 0,01 мг/см<sup>3</sup> наночастинок нікелю та силіцію змін фенотипу в піддослідних особин ліній *Canton S* і *Ebony* не виявлено. Водночас на підставі статистичного аналізу висунуто гіпотезу про наявність певного летального впливу на особин *D. melanogaster* чоловічої статі всіх трьох розглянутих класів наночастинок у концентраціях 0,1 мг/см<sup>3</sup> і 0,01 мг/см<sup>3</sup>. Таким чином, перспективи використання наночастинок титану в медицині та фармакології вкрай обмежені, а перспективи використання наночастинок нікелю та силіцію потребують подальших ґрунтовних досліджень.

### Фінансування / Funding

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

### Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Набір даних доступний за запитом до авторів / Dataset available on request from the authors.



**Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement**

Експериментальні процедури були схвалені Комісією з біоетики Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка (№ протоколу: 5, 3 жовтня 2024 р., Чернігів, Україна) / The experimental procedures were approved by the Bioethics Committee of T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium» (Protocol Number: 5, 3 October 2024, Chernihiv, Ukraine).

**Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement**

Не застосовується / Not applicable.

**References**

Androshchuk, H. O., Yamchuk, A. V., Berezniak, N. V., Kvasha, T. K., Musina, L. A., & Novitska, H. V. (2017). *Nanotechnology in the 21st century: strategic priorities and market approaches to implementation: monograph*. Kyiv. (in Ukrainian)

Нанотехнології у XXI столітті: стратегічні пріоритети та ринкові підходи до впровадження : монографія / Г. О. Андрощук та ін. Київ : УкрІНТЕІ, 2017. 275 с.

Moskalenko, V. F., Lisovyi, V. M., & Chekman, I. S. (2009). Scientific foundations of nanomedicine, nanopharmacology and nanopharmacy. *Scientific Bulletin of Bogomolets NMU*, (2), 17-31. (in Ukrainian)

Наукові основи наномедицини, нанофармакології та нанофармації / В. Ф. Москаленко та ін. *Науковий вісник НМУ ім. О. О. Богомольця*. 2009. № 2. С. 17–31.

Pedan, L. R., & Tymchenko, O. I. (2014). The influence of external factors on the occurrence of mutations in the *Drosophila* population and their relationship with fertility. *Hygiene of populated places*, (64), 356-367. (in Ukrainian)

Педан Л. Р., Тимченко О. І. Вплив зовнішніх факторів на виникнення мутацій у популяції дрозофіли і їхній зв'язок з плодовитістю. *Гігієна населених місць*. 2014. № 64. С. 356–367.

Protsenko, O. V. (2009). *Genetic processes in natural populations of *Drosophila Melanogaster* in Ukraine* (author's abstract of the dissertation of the candidate of biological sciences). Institute of Cell Biology and Genetic Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv, Ukraine. (in Ukrainian)

Проценко О. В. Генетичні процеси в природних популяціях *Drosophila Melanogaster* України : автореф. дис. ... канд. біол. наук : 03.00.15. Київ, 2009. 18 с.

Protsenko, O. V., & Kozeretska, I. A. (2006). Mutational processes in natural populations of *Drosophila melanogaster* in Ukraine. *Collection of scientific works. Factors of experimental evolution of organisms*, 3, 49–53. (in Ukrainian)

Проценко О. В., Козерецька І. А. Мутаційні процеси в природних популяціях *Drosophila melanogaster* України. *Збірник наукових праць. Фактори експериментальної еволюції організмів*. Київ. 2006. Т. 3. С. 49–53.

Selivon, M., Mekhed, O., & Tretiak, O. (2012). The effect of imidazoazepine derivatives on the biological parameters of *Drosophila melanogaster*. *Chemical and environmental education: state and prospects of development: Collection of materials of the II All-Ukrainian scientific and practical conference*. Vinnytsia: Ukraine. P.179-181 (in Ukrainian)

Селівон М. В., Мехед О. Б., Третяк О. П. Вплив похідних імідазоазепінію на біологічні показники *Drosophila melanogaster*. *Хімічна та екологічна освіта: стан і перспективи розвитку* : Збірник матеріалів II Всеукраїнської науково-практичної конференції. Вінниця : ФОП Корзун Д.Ю., 2012. С. 179 -181

Syvolob, A. V., Rushkovskiy, S. R., & Kyriachenko, S. S. (2018). *Genetics: a textbook*. Kyiv. (in Ukrainian)

Сиволоб А. В., Рушковський С. Р., Кир'яченко С. С. Генетика: підручник. Київ : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2018. 320 с.

Solodovnyk, P., Mekhed, O., & Tretiak, O. (2011). Influence of imidazoazepinium heterocyclic compounds on some biochemical indicators of *Drosophila melanogaster* imago. *Falzfeyn readings*. Collection of scientific papers. Kherson: Ukraine. P. 128-129. (in Ukrainian)

Солодовник П. В., Мехед О. Б., Третьак О. П. Вплив гетероциклічних сполук імідазоазепінію на деякі біохімічні показники імаго *Drosophila melanogaster*. *Фальцфейнівські читання*. Збірник наукових праць. Херсон : ПП Вишемирський, 2011. С. 128 -129.

Trachtenberh, I. M. (2013). Nanoparticles of metals, production methods, fields of application, physicochemical and toxic properties. *Ukraine journal on problems of occupational health*, (4), 62–74. (in Ukrainian)

Трахтенберг І. М. Наночастинки металів, методи отримання, сфери застосування, фізико-хімічні та токсичні властивості. *Укр. журн. з проблем медицини праці*. 2013. № 4 (37). С. 62–74.

Yaschenko, A., Yachna, M., Mekhed, O., & Tretyak, O. (2023). Influence of nanoparticles (Ti, Ni, Si) on indicators of induced mutations of *Drosophila melanogaster*. *Biota. Human. Technology*, (1), 34-40.

Received: 06.11.2024. Accepted: 01.12.2024. Published: 30.12.2024.

**Ви можете цитувати цю статтю так:**

Любчикова Д., Нагорний П., Дедович В., Дятлов Ю., Третьак О. Мутагенний вплив наночастинок нікелю, силіцію, титану на онтогенез *Drosophila melanogaster*. *Biota. Human. Technology*. 2024. №3. С. 61-68.

**Cite this article in APA style as:**

Liubchykova, D., Nahornyi, P., Dedovych, V., Diatlov, Yu., & Tretiak, O. (2024). Mutagenic influence of nanoparticles of nickel, silicon, titanium on ontogenesis *Drosophila melanogaster*. *Biota. Human. Technology*, 3, 61-68.

**Information about the authors:**

**Liubchykova D.** [in Ukrainian: **Любчикова Д.**] <sup>1</sup>, undergraduate student, email: liubchykovadariia@gmail.com

ORCID: 0009-0003-7103-0442

Department of Physics and Astronomy, T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium»  
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

**Nahornyi P.** [in Ukrainian: **Нагорний П.**] <sup>2</sup>, Master's student, email: mob8791@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4587-525X

Department of Biology, T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium»  
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

**Dedovych V.** [in Ukrainian: **Дедович В.**] <sup>3</sup>, Cand. Sc. (Pedagogics), Assoc. Prof., email: dedvalcher@ukr.net

ORCID: 0000-0003-1963-1606

Department of Physics and Astronomy, T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium»  
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

**Diatlov Yu.** [in Ukrainian: **Дятлов Ю.**] <sup>4</sup>, Cand. Sc. (History), Assoc. Prof., email: dvfilm@ukr.net

ORCID: 0000-0001-5456-2437

Department of Physics and Astronomy, T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium»  
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

**Tretiak O.** [in Ukrainian: **Третьак О.**] <sup>5</sup>, Cand. Sc. (Biol.), Prof., email: alexandr.tretyak@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8989-1601 Scopus Author ID: 6701474120 ResearcherID: AET-6326-2022

Department of Biology, T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium»  
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

<sup>1</sup> Data collection, statistical analysis.

<sup>2</sup> Data collection, statistical analysis, manuscript preparation.

<sup>3</sup> Manuscript preparation.

<sup>4</sup> Manuscript preparation.

<sup>5</sup> Study design.