

ВПЛИВ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА РІСТ ТА РОЗВИТОК КАРТОПЛІ (*SOLANUM TUBEROSUM* L.)

Цибуля С.Д.¹, Мачульський Г.М.², Буяльська Н.П.¹, Костенко І.А.¹, Іваненко К.М.¹

¹Національний університет «Чернігівська політехніка»

вул. Шевченка, 95, 14035, м. Чернігів

²Національний університет «Чернігівський колегіум ім. Т.Г. Шевченка»

вул. Гетьмана Полуботка, 53, 14013, м. Чернігів

stcibula@gmail.com, buialaska@gmail.com

Радіочутливість картоплі (*Solanum tuberosum* L.) визначали через 15 і 30 днів після опромінення (гама-випромінювання, 10–25 Гр) за первинними ростовими процесами (за масою, кількістю проростків і корінців проростків). Кращі результати отримані серед 4n-форм. Мінімальною радіочутливістю характеризувався український сорт Слов'янка. Зростання проростків і корінців диплоїдів суттєво не змінювалося при дозі 10 Гр. У той же час, при цій дозі спостерігалася стимуляція ростових процесів тетраплоїдів. Маса рослин змінювалася більше, ніж кількість проростків та корінців. При збільшенні дози опромінення частота хромосомних аберацій зростає майже в 2 рази. Виявлено затримку у зростанні та розвитку диплоїдних сортів та гібридів, яка зберігалася протягом усього вегетаційного періоду, при збільшенні дози гамма-випромінювання. Радіаційна депресія, що видно вже з появою проростків, підтверджується результатами вивчення врожайності опромінених рослин. У тетраплоїдів мутагенна стимуляція спостерігалася в більшості варіантів, як за зростанням, розвитком, так і за врожайністю (для диплоїдів значний ефект відмічено лише при дозах 10, 15 Гр і лише за показником врожайності). Стимуляція ростових процесів тетраплоїдного сорту Слов'янка відзначена при всіх дозах гамма-опромінення (від 10 до 25 Гр). Морфологічні аномалії під впливом радіації виявлялися на початку розвитку рослин. Радіоморфози листової пластинки відзначені у тетраплоїдів, з мінімальним значенням у сорту Слов'янка. При цьому диплоїди не мали таких радіоморфозів. Для них були характерні хлорофільні мутації типу *jellow variegated* (строкатість). У період активного цвітіння максимальна фертильність пилку опромінених рослин була при дозах 10, 15 Гр. Це пов'язано із активацією редокс-ферментів (пероксидази та поліфенолоксидази). Серед 4n-форм опромінених рослин український сорт Слов'янка мав найвищий рівень крохмалистості та стійкості до фітофторозу та вірусів (візуальний контроль). Встановлено, що цей сорт зберігає свої якісні та кількісні показники при радіоактивному забрудненні (до 1 Ку/км²) сільськогосподарських угідь (дослідження проводились у Чернігівській області). *Ключові слова:* екологічний фактор, гамма-випромінювання, картопля, радіаційні ураження, стимуляція росту, сорт, гібрид.

The influence of ionizing radiation on the growth and development of potato (*Solanum tuberosum* L.). Tsybulya S., Machulskyi H., Buialaska N., Kostenko I., Ivanenko K.

The radiosensitivity of potato (*Solanum tuberosum* L.) was determined in 15 and 30 days after gamma-ray irradiation (10–25 Gy) based on primary growth processes (by weight, number of seedlings and seedling roots). The best results were among the 4n forms. The Ukrainian variety Slavyanka was characterized by minimal radiosensitivity. The growth of seedlings and roots of diploids did not change significantly at a dose of 10 Gy. At the same time, stimulation of growth processes in tetraploids was observed at this dose level. The mass of plants changed more than the number of seedlings and roots. The frequency of chromosomal aberrations increases almost 2 times with increasing radiation dose level. A delay in the growth and development of diploid varieties and hybrids, which persisted throughout the growing season when increasing the gamma radiation dose level, was revealed. Radiation depression, which is visible already with the appearance of seedlings, is confirmed by the results of studying the yield of irradiated plants. Mutagenic stimulation of tetraploids was observed in most options, both in indicators of growth, development and yield (for diploids, a significant effect was observed only at doses of 10, 15 Gy and only in terms of yield). Stimulation of growth processes in the tetraploid variety Slavyanka was observed at all level of gamma radiation doses (from 10 to 25 Gy). Morphological anomalies under the influence of radiation were detected at the beginning of plant development. Radiomorphoses of the leaf blade were detected in tetraploids, with a minimum value in the Slavyanka variety. At the same time, diploids did not have such radiomorphoses. They were characterized by chlorophyll mutations such as *jellow variegated*. During the period of active flowering, the maximum of fertile pollen grains of irradiated plants was at doses of 10 and 15 Gy. This is due to the activation of redox enzymes (peroxidase and polyphenol oxidase). Among the 4n-forms of irradiated plants, the Ukrainian variety Slavyanka had the highest level of starchiness and resistance to late blight and viruses (visual control). It has been established that this variety retains its qualitative and quantitative indicators in case of radioactive contamination (up to 1 Ku/km²) of farmland (the study was carried out in the Chernigov region). *Key words:* environmental factor, gamma radiation, potato, radiation damage, growth stimulation, variety, hybrid.

Постановка проблеми. Іонізуюче випромінювання є відомим мутагенним фактором, ефекти впливу якого мають як детермінований, так і стохастичний характер. Вивчення його впливу на живі організми далеко продовжується і в наш час, враховуючи величезну кількість видів сучасної біоти, кожен із яких у процесі еволюції придбав унікальні характе-

ристики, що визначають комплекс адаптацій до чинників довкілля. Мутації, що виникають під впливом іонізуючого випромінювання можуть як підвищити, так і знизити адаптаційні можливості живих організмів. Визначення таких наслідків опромінювання не завжди є простим завданням. Для його вирішення необхідно мати якомога найповнішу біологічні та

екологічні характеристики організмів, які зазнали опромінення. Вони необхідні для подальшого порівняльного аналізу, результатами якого стане оцінка наслідків змін, що виникли. Такі характеристики вже встановлені насамперед для сільськогосподарських рослин, які, отже, є зручними модельними об'єктами для досліджень. Враховуючи господарську значущість сільськогосподарських рослин, результати досліджень щодо аналізу впливу на них іонізуючого випромінювання безперечно мають не лише наукову, а й практичну значущість.

Мета дослідження – проаналізувати вплив гамма-випромінювання на ряд ди- та тетраплоїдних сортів і гібридів картоплі.

Актуальність дослідження. Визначення ефектів впливу іонізуючого випромінювання на сільськогосподарські культури є актуальним завданням, що пов'язане з необхідністю підйому врожайності за рахунок отримання нових сортів, стимулювання розвитку рослин, а також підвищення стійкості до несприятливих факторів середовища, що виникають внаслідок сучасних кліматичних змін та забруднення ґрунтів радіонуклідами після аварії на ЧАЕС. Вивчення впливу іонізуючого випромінювання на сільськогосподарські рослини є також актуальними у зв'язку з необхідністю отримання фундаментальних наукових відомостей, які можуть бути екстрапольовані на інші біологічні об'єкти.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Визначення радіочутливості сільськогосподарських рослин є частиною фундаментальних досліджень у галузі вивчення екології рослин, оскільки дозволяє проаналізувати вплив на рослинні організми іонізуючого випромінювання як одного з абіотичних факторів середовища. Крім того, виявлення особливостей впливу іонізуючого випромінювання на сільськогосподарські культури сприяє рішенням прикладних завдань у напрямку забезпечення населення продовольством. Виявлення радіочутливості картоплі є важливим завданням в Україні у зв'язку з необхідністю оптимізації підбору сортів для одержання необхідного врожаю в умовах кліматичних змін та антропогенного забруднення ґрунтів, у тому числі радіонуклідами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження щодо визначення наслідків опромінення картоплі проводили у різних напрямках. Важливе практичне значення мають дослідження в області отримання картоплі з підвищеною стійкістю до факторів середовища. Так, проведено дослідження по отриманню картоплі з підвищеною солета посухостійкістю [1–3]. Гама-випромінювання використано як мутагенний фактор при виробництві мікроклубнів диплоїдної та тетраплоїдної картоплі [4, 5]. Проведено також дослідження з виявлення впливу гамма-випромінювання на калюсні клітини картоплі [6]. Одним з найбільш поширених напрям-

ків досліджень є вивчення змін властивостей бульб картоплі, у тому числі структурних властивостей крохмальних зерен, після їх опромінення різними дозами [7, 8].

При цьому результати, отримані різними авторами, можуть значно відрізнятися. Так, при вивченні впливу гамма-випромінювання на насіння картоплі в якості оптимальної дози, яка стимулює їх проростання, одні автори наводять дозу в 20 Гр, інші – на порядок більше [9, 10].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Невирішеними залишаються питання радіочутливості окремих сортів і гібридів картоплі, що визначається за станом опромінених рослин протягом усього періоду росту та розвитку.

Новизна. Отримано результати комплексного вивчення ефектів впливу іонізуючого випромінювання, у тому числі утвореного при розпаді ^{137}Cs та ^{90}Sr у забрудненому ґрунті, на ряд ди- та тетраплоїдних сортів і гібридів картоплі.

Методологічне або загальнонаукове значення. Проведена робота відображає комплексний підхід до вивчення впливу іонізуючого випромінювання на рослини. Він включає аналіз ефектів опромінення за допомогою таких показників як частота хромосомних аберацій у кінчиках корінців, динаміка росту рослин, частота морфологічних змін, фертильність пилку та ряду інших. Використання цього підходу дозволяє простежити наслідки опромінення протягом зростання та розвитку рослин. Його використання є доцільним щодо радіочутливості як сільськогосподарських культур, так і дикорослих рослин, у тому числі тих, що мають природоохоронні категорії.

Виклад основного матеріалу. Радіочутливість картоплі було проаналізовано на тетраплоїдних сортах Світанок Київський, Резерв, Істринський, Слов'янка, а також гібридах 276-662, 946-3, а також на диплоїдах ПДС 83-44, Т-707, Р1225694, L-10.

Радіочутливість обраних для дослідження сортів картоплі визначали через 15 і 30 діб після гамма-опромінення (10–25 Гр) у лабораторних умовах теплиці за кількістю і масою проростків та корінців. Цитологічний аналіз первинних корінців (20–30 у кожному варіанті) проводили за допомогою ацетокармінових препаратів, з визначенням відсотка хромосомних аберацій (мости, фрагменти) в анафазі та телофазі першого мітоза (10–30 проб).

Бульби масою 50–70 г (4n) і 10–30 г (2n) піддавали гамма-опроміненню (10–25 Гр) та використовували у польових випробуваннях. Контроль – неопромінені бульби. В період вегетації враховували схожість, динаміку росту та розвитку, з вивченням морфологічних змін, з виявленням радіоморфозів.

У фазу активного цвітіння, визначали активність редокс-ферментів (пероксидази та поліфенолоксидази) у зернях пилку 2n- і 4n-гамма-опромінених форм

картоплі та фертильність пилку забарвленням в ацетокарміні та оглядом у 10 полях зору під мікроскопом ($\times 420$). Активність редокс-ферментів визначали спектрометричним методом (СФ-16). Субстрати – пірогалол (для пероксидази) та пірокатехін (для поліфенолоксидази). Результат виражали у одиницях зміни оптичної густини на 1 г сирової маси за 1 хв.

У період вегетації оцінювали стійкість картоплі до вірусних хвороб, фітофтори. Після збору врожаю оцінювали врожайність, крохмалистість картоплі. Крохмалистість визначали 2 методами: за Еверсом – поляриметрією, за відхиленням площини поляризації поляризованого променя, та спектрофотометрією за інтенсивністю забарвлення йод-крохмального комплексу.

Результати експериментів обробляли методами математичної статистики, з використанням стандартної помилки S (при $n = 6$, $t = 2,75$, та довірчій ймовірності $0,95$, вона складала: $S = \pm 5-10\%$). Визначали також коефіцієнт кореляції r регресійним аналізом (методом найменших квадратів). Малоймовірні дані не враховували за Q -критерієм [11].

Результати досліджень з вивчення впливу гамма-випромінювання на динаміку росту проростків, корінців картоплі (Слов'янка, Резерв, Світанок Київський, 276-662, P1225694, ПДС 83-44, T-707) із різною плодючістю до контрастних доз гамма-опромінення (10 і 25 Гр) у первинних ростових процесах (через 15 і 30 діб) представлені в таблиці 1 (позначення в таблиці наступні: а – за середньою масою, б – за кількістю, шт.).

Доза 10 Гр суттєво не впливала на ріст проростків та корінців диплоїдів і викликала стимуляцію ростових процесів тетраплоїдів. Більшій зміні піддавалась маса, чим кількість проростків, корінців.

Встановлено, що при збільшенні дози випромінювання частота хромосомних аберацій зростає майже в 2 рази. В пострадіаційний період (30 діб) спостерігалось відновлення від радіаційного ураження, особливо у тетраплоїдів, завдяки збільшеному набору хромосом. У диплоїдів ослаблені радіацією клітини можуть загинути.

Кращі результати серед 4n-форм спостерігали у українського сорту Слов'янка, а серед 2n-форм – у T-707.

Одним з важливих критеріїв оцінки радіочутливості опромінення є частота індукованих хромосомних аберацій. Експериментальні дані щодо впливу гамма-випромінювання (10 і 25 Гр) на зміну хромосом в анафазі та телофазі мітозу первинних корінців ряду сортів та гібридів представлені в таблиці 2.

З таблиці 2 видно, що у тетраплоїдів більше пошкоджених клітин (мостів, фрагментів), в порівнянні з диплоїдами. Але, враховуючи, що у тетраплоїдних клітин число хромосом більше, розраховували відсоток пошкоджень на 1 хромосому. Виявилось, що кількість хромосомних аберацій у тетраплоїдів має тенденцію до зниження. Мінімальну частоту хромосомних аберацій спостерігали у українського сорту Слов'янка (4n), максимальну – у ПДС 83-44 (2n). Треба зауважити, що завдяки дрібним хромосомам картоплі, вона більш радіостійка, ніж інші

Таблиця 1

Вплив гамма- випромінювання на динаміку росту проростків, корінців картоплі, % до контролю

Сорт, форма	Дози, Гр	Проростки				Корінці			
		15		30		15		30	
		а	б	а	б	а	б	а	б
4n									
Слов'янка	10	119,1	121,7	117,4	110,3	113,1	120,9	110,7	110,9
	25	45,6	51,9	69,9	57,4	37,8	63,5	47,8	109,3
Резерв	10	117,2	118,4	115,4	109,9	111,4	119,3	109,2	109,3
	25	42,3	44,8	68,7	51,1	36,4	62,9	46,3	74,6
Світанок Київський	10	105,2	115,3	111,8	107,1	106,7	117,1	108,1	111,4
	25	40,1	43,2	63,1	49,4	35,2	65,3	43,9	71,4
276-662	10	104,3	114,8	111,3	106,9	105,8	115,8	107,9	110,0
	25	38,9	42,6	60,3	48,6	33,9	60,0	42,9	69,7
2n									
P1225694	10	97,3	102,4	99,1	101,2	97,1	100,5	98,7	97,1
	25	28,1	37,5	46,3	46,8	31,4	50,8	38,4	59,2
ПДС 83-44	10	98,4	103,3	101,2	102,9	98,8	101,2	100,8	99,4
	25	29,4	39,3	48,9	49,8	29,8	49,3	39,8	60,5
T-707	10	94,7	100,0	100,9	102,0	95,6	102,7	99,8	101,2
	25	32,2	37,3	54,7	41,2	31,7	51,7	41,1	61,4

Частота хромосомних аберацій в кінчиках корінців під впливом гамма-випромінювання

Сорт, форма	Доза, Гр	% пошкоджених клітин	% пошкоджень на 1 хромосому
4n			
Слов'янка	10	6,3	0,14
	25	12,7	0,32
Резерв	10	7,2	0,15
	25	15,8	0,33
946-3	10	9,7	0,18
	25	17,8	0,35
2n			
P1225694	10	4,3	0,18
	25	8,6	0,37
ПДС 83-44	10	4,6	0,19
	25	9,1	0,38
Т-707	10	4,2	0,17
	25	8,7	0,36

культурні рослини (жито, горох, пшениця), де частота хромосомних аберацій досягає значних рівнів (78–94%) [12–16]. Отже, дослідження первинних ростових процесів у бульбах і цитологічний аналіз показали, що збільшенню плідності відповідає стійкість до дії гамма-випромінювання. Це можна пояснити, мабуть, більш швидким відновленням діяльності пошкодженого ядра у тетраплоїдів.

Радіочутливість картоплі у польових випробуваннях проводили на 3-х тетраплоїдних сортах (Резерв, Істринський, Слов'янка) та 2-х гібридах (276-662, 946-3) різної групи сплості та 4-х диплоїдах (ПДС 83-44, Т-707, P1225694, L-10).

Число виживших рослин визначали на 40 день після появи проростків у контролі. Диплоїд L-10 був найбільш ослабленим: навіть в контролі схожість не більше 30% (далі не аналізувався). Відмічали найбільш радіаційну депресію появи проростків у диплоїдних форм Т-707, ПДС 83-44, меншою була у P1225694 (рис. 1).

Серед 4n-форм кращі результати були у українського сорту Слов'янка, найгірші – у гібрида 946-3, проростки якого при 25 Гр з'явилися на 9 діб пізніше контролю. На відміну від тетраплоїдів, у диплоїдів із збільшенням дози гамма-опромінення відбувалася затримка у рості і розвитку, яка зберігалася протягом всього періоду вегетації.

Одержані результати (рис. 1) демонструють дозову залежність початку фаз розвитку рослин, яка найбільше проявилася у диплоїдів. Тому при дозі 25 Гр повне цвітіння у них відмічалася на 11–21 діб пізніше контролю, а у тетраплоїдних – на 9–18 діб.

За час вегетаційного періоду зростання та розвиток картоплі спрямовані не тільки на запилення та

формування насіння, а й запасання крохмалю в бульбах для подальшого перенесення несприятливого періоду року. Отже, ступінь утворення бульб після опромінення є важливим показником впливу іонізуючого випромінювання на цей вид рослини в цілому та його різних сортів та гібридів зокрема.

Під час збирання врожаю проводили пошуковий облік кількості й маси бульб, результати якого показані в таблиці 3 (позначення в таблиці наступні: а – за масою бульб (% до контролю), б – за кількістю бульб (% до контролю)).

Експериментальні дані про врожайність картоплі (табл. 3) підтверджують наявність радіаційної депресії, що встановлено на початок росту і розвитку рослин – при появі проростків. Максимально врожайним був український сорт Слов'янка. Найбільше зниження врожаю за масою бульб (4n) спостерігали при дозі 25 Гр у гібрида 946-3 (29,7%) і у сорта Світанок Київський (28,1%), мінімальне – у гібрида 276-662 (7,1%) і Резерв (16,2%). У диплоїдів максимальне зниження (47,7%) спостерігалось у ПДС 83-44 і Т-707 (36,3%). Разом з тим, в дозах 10–15 Гр відмічалось підвищення врожайності, в основному, за рахунок збільшення маси однієї бульби на 50,7% (при 10 Гр) у ПДС 83-44 і 32,3% (15 Гр) у Т-707. Маса 1 бульби зростала при збільшенні дози (15 Гр) і у тетраплоїдів – у Резерва – на 74%, тоді як у гібрида 946-3 – лише на 4%. Сорт Резерв зберігав підвищення (на 56%) маси однієї бульби і при дозі 25 Гр. Тому зниження врожаю цього сорту при 25 Гр (на 17,2%) відбувалося за рахунок зниження числа бульб (на 24,1%), в порівнянні з контролем.

Отримані результати мають практичну значимість, оскільки іонізуюче випромінювання у певних

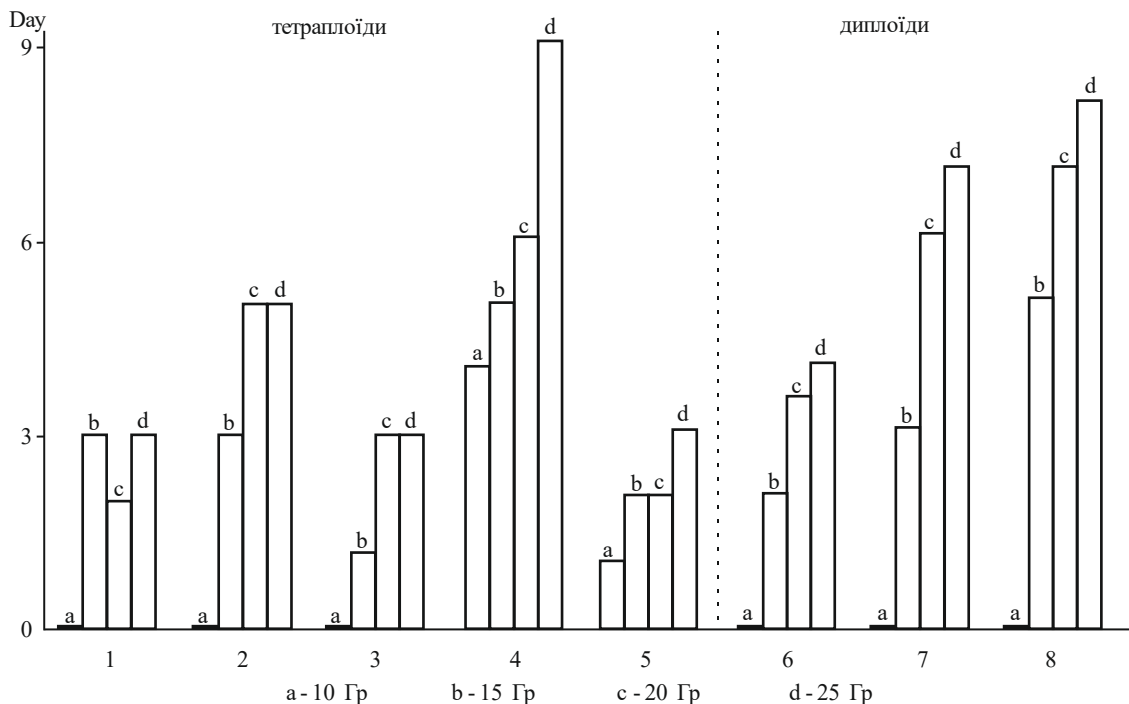


Рис. 1. Радіаційна депресія появи проростків (затримка порівняно з контролем) 4n- і 2n-форм картоплі: 1 – Істринський, 2 – Резерв, 3 – Слов'янка, 4 – 946-3, 5 – 276-662, 6 – P1225694, 7 – T-707, 8 – ПДС 83-44

Таблиця 3

Вплив гамма-випромінювання на врожайність картоплі, %

Сорт, форма	Показник	Доза випромінювання, Гр			
		10	15	20	25
4n					
Слов'янка	а	99,2	97,5	84,9	85,2
	б	106,9	79,3	76,7	77,8
Резерв	а	97,1	94,6	76,8	83,8
	б	105,3	76,7	66,9	75,9
Світанок Київський	а	87,1	84,9	72,5	71,9
	б	70,9	71,6	64,8	65,6
2n					
P1234013	а	111,0	90,9	59,1	55,2
	б	92,3	80,1	51,9	45,7
ПДС 83-44	а	122,1	121,4	62,1	52,3
	б	93,8	91,7	58,3	49,3
T-707	а	132,1	79,6	57,8	63,7
	б	94,0	72,1	47,8	36,3

дозах демонструє стимулюючу дію на ріст та розвиток рослин. У разі сільськогосподарських рослин ця стимулююча дія може призводити до підвищення врожайності. Так, виявлено врожайні сорти (за нижнім рівнем високої врожайності по середньому значенню контролю) та стимульовані (за перевищенням максимального рівня врожайності контролю). У Резерва

і Слов'янки стимульовані рослини відмічені при всіх дозах гамма-випромінювання (від 10 до 25 Гр), відповідно: 9–4% та 12–8%. На відміну від тетраплоїдів, у диплоїдів при 25 Гр не відмічено появу стимульованих рослин (за масою та кількістю бульб).

Експерименти показали, що диплоїди більш чутливі до впливу радіації. В той час як у тетраплоїдів

мутагенна стимуляція спостерігалася у більшості варіантів, як за ростом, розвитком, так і за врожайністю, для диплоїдів значимий ефект відмічено лише при дозах 10, 15 Гр і тільки за показником врожайності.

Вивчено ступінь мінливості різних сортів та гібридів картоплі під впливом гамма-випромінювання в період від сходів до кінця вегетації за морфологічними ознаками (змінюючи форми листової пластинки та хлорофільними мутаціями).

Спостереження проводили двічі за вегетацію: після появи проростків і до цвітіння. Морфологічні аномалії під дією радіації (радіоморфози) спостерігалися більш суттєво з початку розвитку. Найбільш часто радіоморфози листової пластинки були у тетраплоїдних гібридів: 946-3 – 40–60%, 276-662 – 45–50%.

Із збільшенням дози гамма-випромінювання (10–25 Гр) частота радіоморфозів збільшується у середньому, від 33,3 до 46,7% (табл. 4), з мінімальним значенням у сортів Слов'янка і Істринський (28 і 30%). У диплоїдів подібні радіоморфози не виявлені. В них відмічені хлорофільні мутації типу *jellow variegated* (строкатість). При 25 Гр максимум хлорофільних мутацій був у Т-707 (18,6%), хоча при 10, 15 Гр вони були відсутні. Оцінка мутабельності картоплі при 25 Гр показала, що тетраплоїдні рослини мають меншу мутабельність проти диплоїдних. Але у розрахунку на 1 хромосому, тетраплоїди при більш високій частоті мутацій (28,8%) і хромосомних аберацій (46,7%), мали менший відсоток мутацій (0,60) і хромосомних пошкоджень (0,34) проти диплоїдів (0,81 та 0,37, відповідно).

Одним із найбільш важливих показників впливу іонізуючого випромінювання на насінневі рослини є кількість стерильних пилових зерен.

Максимальна фертильність для вивчених сортів та гібридів була при дозах 10, 15 Гр. Найбільші значення мав український сорт 4n Слов'янка. Діплоїдні форми мали меншу фертильність проти тетраплоїдів. Але опромінені 2n форми збільшували фертильність більш суттєво на 12–14% проти тетраплоїдів (10–11%).

Фертильність, здебільшого, обумовлена інтенсивністю редокс-процесів й активністю редокс-ферментів (табл. 5).

Ступінь підвищення активності редокс-ферментів, проти контролю, показана для стимульованих форм на рисунку 2: за пероксидазою – 13,3–20,8%, за поліфенолоксидазою – 20,1–22,2%. Це дозволяє зробити висновок, що гамма-випромінювання (15 Гр) стимулює ступінь активації редокс-ферментів, як у тетраплоїдів, так і у диплоїдів картоплі, при цьому у останніх у більшій мірі.

Ушкодження, які можуть спричинити іонізуюче випромінювання, здатні знизити стійкість рослин до патогенів. У зв'язку з цим визначення ступеня ураження опромінених рослин збудниками грибкових та вірусних інфекцій наочно демонструє їх загальну радіочутливість.

Візуальний контроль ураження рослин фітофторою та вірусами проводили на 4n (Слов'янка, Істринський) і 2n (ПДС 83-44) опромінених (15 Гр) формах картоплі (рис. 3).

Ступінь ураження фітофторою складає 28,3–31,6%, вірусами – 10,1–11,8%. Менше ураження спостерігали у 2n-форми. Серед 4n-форм крашим був сорт Слов'янка.

У ході проведених досліджень також визначено крохмалистість бульб вивчених форм картоплі. В цілому крохмалистість змінювалася від 17,1 до 20,9%.

Таблиця 4

Середня частота морфологічних змін у досліджених сортів та гібридів, %

Доза випромінювання, Гр	Радіоморфози у тетраплоїдів	Хлорофільні мутації у диплоїдів
10	33,3	0
15	37,5	3,2
20	39,2	13,6
25	46,7	16,5

Таблиця 5

Фертильність пилку стимульованих 4n- і 2n-форм картоплі, %

Сорт, форма	Доза випромінювання, Гр			
	контроль	10	15	20
4n				
Слов'янка	62,0	73,4	72,5	68,5
Резерв	58,9	69,1	71,6	61,2
Істринський	61,2	72,1	71,2	67,3
2n				
ПДС 83-44	45,4	59,1	53,9	46,3
P1225694	46,1	60,4	54,2	47,9
Т-707	43,2	53,3	52,4	44,4

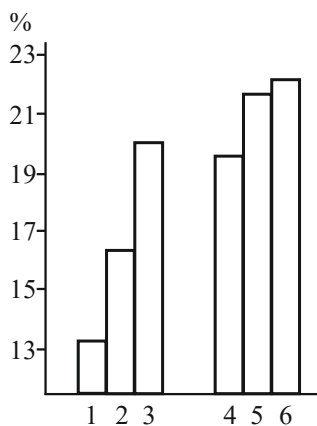


Рис. 2. Ступінь активації редокс-ферментів: 1-3 – пероксидаза, 4-6 – поліфенолоксидаза, 1, 4 – Істринський, 2, 5 – Слов'янка, 3, 6 – ПДС 83-44

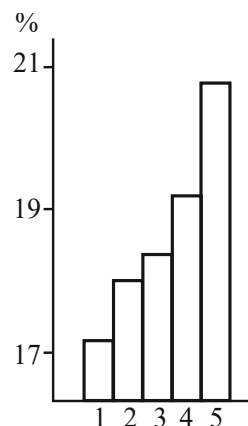


Рис. 4. Крохмалистість 4n-, 2n-форм картоплі, гамма-опроміненою дозою 15 Гр: 1 – ПДС 83-44, 2 – P1225694, 3 – Істринський, 4 – Резерв, 5 – Слов'янка

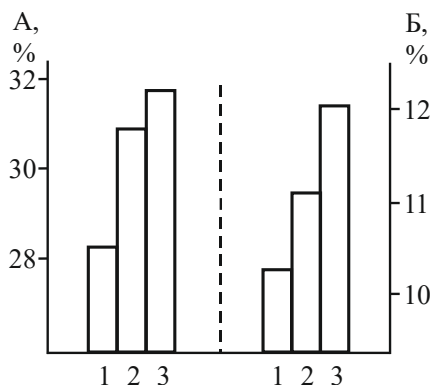


Рис. 3. Ступінь ураження картоплі фітофторою (А) і вірусами (Б): 1 – ПДС 83-44, 2 – Слов'янка, 3 – Істринський

Серед 4n гамма-опромінених форм картоплі максимальну крохмалистість мав український сорт Слов'янка, серед 2n-форм – P1225694 (рис. 4).

Характерно, що вказані сорти та гібриди картоплі не знижували своїх показників в умовах радіаційного забруднення (до 1 Ки/км²) сільгоспугідь Чернігівщини (Ріпкинський район), і навіть їх дещо підвищували при обробці ґрунту захисною композицією за рахунок інгібування радіолізного ефекту. Отримані результати показані в таблиці 6 (позначення в таблиці наступні: А_Σ' – після обробки ґрунту синергічною захисною композицією (СЗК)).

Український сорт Слов'янка мав максимум крохмалистості (рис. 5).

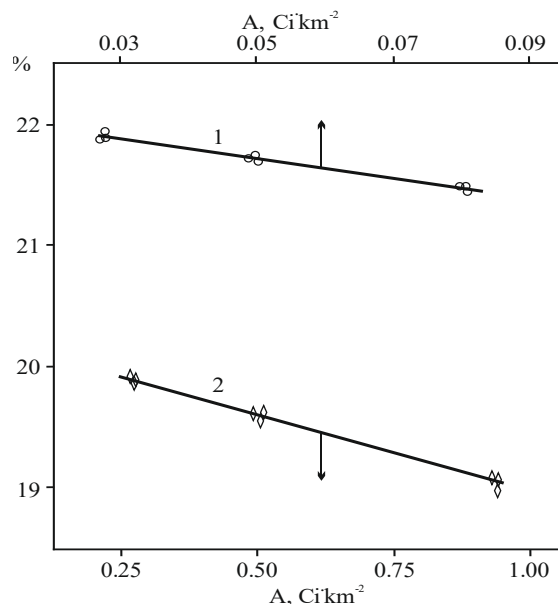


Рис. 5. Крохмалистість українського сорту Слов'янка в умовах радіаційного забруднення ґрунту: 1 – з обробкою СЗК, 2 – без СЗК

Головні висновки. Встановлено, що доза гамма-опромінення в 25 Гр викликає радіаційну депресію – гальмування первинних ростових процесів картоплі. Доза гамма-випромінювання 10 Гр викликала у тетраплоїдів стимуляцію ростових процесів, максимально у Слов'янки – на 17,4 і 10,7%, і мало

Таблиця 6

Характеристика радіаційного забруднення ґрунту, А, Ки/км²

Зразки ґрунту	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	A _Σ	A _Σ '
1	0,80	0,12	0,92	0,080
2	0,41	0,09	0,50	0,050
3	0,22	0,05	0,27	0,029

впливала на диплоїди – ростові процеси були, практично, на рівні контролю.

Визначення частоти індукованих хромосомних аберацій показало, що у тетраплоїдів пошкоджених клітин було більше (при 25 Гр: 12,7–17,8%, мінімально – у Слов'янки) проти диплоїдів (8,6–9,1%). Але у перерахунку на 1 хромосому у тетраплоїдів їх було дещо менше (0,32–0,35), ніж у диплоїдів (0,36–0,38). При збільшенні дози опромінення від 10 до 25 Гр частота пошкоджень збільшується у 2 рази. Це призводить до радіаційної депресії появи проростків і зниження врожайності картоплі.

Показано, що диплоїди більш чутливі до впливу радіації, значимий позитивний ефект відмічається лише при дозах 10, 15 Гр і, в основному, за показником врожайності.

Визначено частоту радіоморфозів досліджених сортів та гібридів, яка у тетраплоїдів зростає від 33,3

до 46,7%. У диплоїдів вони були відсутні, а спостерігалися хромосомні мутації типу yellow variegated (строкатість).

Відмічено, що максимальна фертильність пилку була при випромінюванні 10, 15 Гр, з найбільшим значенням 73,4 і 72,5% у тетраплоїда Слов'янка.

Менші значення спостерігали у диплоїдів (60,4 і 54,2%). Це корелює з підвищенням ступеня активності редокс-ферментів (пероксидази та поліфенолоксидази).

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати можуть бути використані в подальших дослідженнях по вивченню впливу іонізуючого випромінювання на рослини. Вони можуть знайти застосування в сільськогосподарській практиці як при підборі сортів і гібридів картоплі з підвищеною радіостійкістю, так і при проведенні селекційної роботи.

Література

1. Yayıci O., Alikamanoğlu S. Induction of salt-tolerant potato (*Solanum tuberosum* L.) mutants with gamma irradiation and characterization of genetic variations via RAPD-PCR analysis. *Turk J Biol.* 2012. Vol. 36. P. 405–412.
2. Impact of gamma irradiation pretreatment on biochemical and molecular responses of potato growing under salt stress / E.A. Mohamed et al. *Chem. Biol. Technol. Agric.* 2021. Iss. 8. No. 35.
3. Stability and anatomical parameters of irradiated potato cultivars under drought stress / S.Y. Naiem et al. *Saudi Journal of Biological Sciences.* 2022. Iss. 29. P. 2819–2827.
4. Micro-tuber production in diploid and tetraploid potato after gamma irradiation of *in vitro* cuttings for mutation induction / S. Bado et al. *American Journal of Plant Sciences.* 2016. Vol. 7. P. 1871–1887.
5. Mahfouze S.A., Esmael A.M., Mohasseb H.A.A. Genetic improvement of potato microtuber production *in vitro* by gamma irradiation. *Biotechnología Aplicada.* 2012. Vol. 29. No. 4. P. 253–257.
6. Efecto de las radiaciones gamma sobre callos de papa var. 'Desirée' / N. Veitia et al. *Biotechnología Vegetal.* 2007. Vol. 7. No. 1. P. 57–61.
7. Dhali K., Basak N., Bhattacharya S. Effect of gamma irradiation on potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers influencing post-harvest quality parameters. *Journal of Crop and Weed.* 2017. Vol. 13. Iss. 2. P. 129–135.
8. Changes in wheat and potato starches induced by gamma irradiation: A comparative macro and microscopic study / H. Atrous. *International Journal of Food Properties.* Vol. 20. No. 7. P. 1532–1546.
9. Salomón Díaz J.L., González Cepero M.C., Castillo Hernández J.G., Nualles M.V. Efecto de los rayos gamma sobre la germinación de la semilla botánica de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Cultivos Tropicales.* 2017. Vol. 38. No. 1. P. 89–91.
10. Подгаєцький А.А., Кравченко Н.В., Падалка Ю.М. Проростання насіння міжвидових гібридів картоплі під впливом гамма-випромінювання. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Агронія і біологія».* 2015. Вип. 30. № 9. С. 43–46.
11. Gordon A., Ford R. *The Chemist's Companion. A Handbook of practical Data, Techniques and References.* New York: Wiley-Interscience Publ., 1972. 541 p.
12. Lowes K., Neele A. Influence of weight of seed tubers on selection of first year clones: preliminary results. *The production of new potato varieties: technological advances* / G.J. Jellis, D.E. Richardson (Eds). Cambridge: Cambridge Univ. press, 1987. P. 78–80.
13. Swaminathan M. *A Comparison of Mutation Induction in Diploids and Polyploids.* New York: Pergamon Press, 1965. 619 p.
14. Miller M. The radiosensitivity of three pairs of diploid and tetraploid plant species: Correlation between nuclear and chromosomal volume, roentgen exposure and energy absorption per chromosome. *Radiation Botany.* 1970. Vol. 10. Iss. 3. P. 273–279.
15. Lachman J., Hamouz K., Orsák M., Pivec V. Potato tubers as a significant source of antioxidants in human nutrition. *Rostlinna Výroba.* 2001. Vol. 46. P. 231–236.
16. Saikhan A., Howard L., Miller J. Antioxidant Activity and total phenolics in different genotypes of potato (*Solanum tuberosum* L.). *J. of Food Science.* 1995. Vol. 60. Iss. 2. P. 341–343.