

МОЛЕКУЛЯРНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ

генів стійкості Ry_{adg} , Ry_{chc} і Ry_{sto} до Y-вірусу картоплі у колекційних зразках картоплі

Мета. Провести скринінг колекції сортів картоплі методом полімеразно-ланцюгової реакції (ПЛР) на наявність трьох генів, які забезпечують екстремальну резистентність (ER) до Y-вірусу картоплі (PVY), а саме Ry_{adg} , Ry_{chc} і Ry_{sto} . **Методи.** Із сортів картоплі українського та закордонного походження виділяли ДНК з листя або бульб картоплі методом, що базується на використанні силіки. Для ідентифікації генів застосовували праймери: $RY1648F24/R22$ — для визначення гена Ry_{chc} , $YES3-A$ — для гена Ry_{sto} та $RYSC3$ — для Ry_{adg} . Ампліфіковані продукти аналізували методом агарозного гель-електрофорезу. **Результати.** Українські сорти вперше досліджено за допомогою прямого молекулярного маркера $RY1648F24/R22$. Було проаналізовано 68 зразків різного походження за цим молекулярним маркером гена Ry_{chc} та ідентифіковано ген інтересу в 11-ти сортах. За молекулярним маркером $YES3-A$ оцінено 34 зразки картоплі та виявлено маркерний амплікон гена Ry_{sto} у 5-ти зразках. Серед 58-ми проаналізованих сортів картоплі ген Ry_{adg} за маркером $RYSC3$ виявлено лише у сорті Ресурс, який також мав маркер гена Ry_{sto} . **Висновки.** Встановлено наявність генів екстремальної стійкості до PVY, Ry_{adg} , Ry_{chc} і Ry_{sto} у 16-ти українських і закордонних сортах картоплі. Сорт Ресурс має поєднання генів Ry_{adg} та Ry_{sto} . Зразки, що були ідентифіковані в ході дослідження як носії генів екстремальної стійкості до PVY, можуть бути залучені до селекційного процесу.

***Solanum tuberosum*; хвороби; Ry_{adg} ; Ry_{chc} ; Y-вірус картоплі; Ry_{sto} ; $RYSC3$; $RY1648F24/R22$**

Y-вірус картоплі (*potato virus Y*, PVY) є одним із найважливіших вірусів, що впливають на світове виробництво картоплі [1]. Він спричиняє значне зниження якості бульб і втрати врожаю до 80% [2]. Величина втрат залежить

¹С.О. КИРИЧЕНКО

¹О.І. БОРЗИХ,
доктор сільськогосподарських наук

²Р.О. БОНДУС,
кандидат сільськогосподарських наук

¹І.О. СОЗІНОВ

³Л.Т. МІЩЕНКО,
доктор біологічних наук

¹Н.О. КОЗУБ,
доктор біологічних наук

¹Інститут захисту рослин НААН,
вул. Васильківська, 33, м. Київ,
03022, Україна

²Устимівська дослідна станція
рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН,
вул. Академіка Вавилова, 15, м. Київ,
39074, Україна

³Київський національний
університет імені Тараса Шевченка,
вул. Володимирська, 64/13, м. Київ,
01601, Україна

від штаму PVY, вірусного навантаження, часу зараження та рівня стійкості рослини [3]. Основний шлях поширення вірусу — через різні види попелиць, але можливе також зараження через інфіковані бульби [4]. Всі дочірні бульби від інфікованих материнських рослин також будуть заражені через системне переміщення вірусу [5]. Рослини з інфікованих бульб ростуть повільніше, що призводить до дегенерації насінневого матеріалу та зниження врожаю [6]. Симптоми PVY включають мозаїку, пошкодження листя, крапчастість, некрози, зморшкватість, згортання країв, деформацію, хлороз із некротичними плямами, опадання листя, затримку росту, раннє старіння та некротичну кільцеву плямистість бульб, що залежать від штаму

вірусу та генотипу рослини [7]. Контроль захворювання ускладнюється генетичним різноманіттям PVY, появою нових, у тому числі рекомбінантних штамів [8, 9]. Оскільки РНК-залежна РНК-полімераза більшості РНК-вірусів не має коригуючої функції [10], це призводить до високої частоти помилок під час реплікації, що забезпечує швидке виникнення генетичної мінливості та нових варіантів [11]. Впродовж останніх 30-ти років спостерігалася стійка тенденція, коли рекомбінантні штами, такі як PVY^{NTN} і PVY^{N-wi}, витіснили нереконбінантні ізоляти PVY^C, PVY^O і PVY^N як найпоширеніші у виробництві картоплі [12]. Рекомбінантний штам PVY^{NTN} нині розповсюджений у всьому світі та завдає більшої шкоди, ніж звичайні штами [13], а також має більшу частоту виявлення. Рослини-хазяї можуть демонструвати сумісну або несумісну взаємодію з вірусами [14]. За несумісної взаємодії рослини обмежують інвазію та реплікацію вірусу, реагуючи екстремальною резистентністю (extreme resistance, ER) або гіперчутливою реакцією (hypersensitive response, HR). У випадку ER симптоми відсутні або дуже обмежені [15], а титри вірусу залишаються дуже низькими [15–17]. Гени екстремальної стійкості до PVY (Ry) пригнічують розмноження вірусу в інфікованих клітинах і ефективні проти широкого спектра штамів [17, 18]. Селекція з використанням молекулярних маркерів екстремальної стійкості є особливо актуальною, оскільки дозволяє розширити асортимент сортів із бажаною стійкістю та залучити лінії різного походження до селекційних програм. Ефек-

тивний захист забезпечують гени екстремальної стійкості Ry_{adg} , Ry_{sto} , Ry_{chc} [19]:

- Ry_{adg} походить від культивованого підвиду картоплі *S. tuberosum* subsp. *andigena* Hawkes, він розташований на хромосомі X [20];
- Ry_{sto} походить від дикого виду *S. stoloniferum* Schldl. & Bouché і розташований на хромосомі XII [21];
- Ry_{chc} походить від *S. cha-coense* Bitt. і знаходиться на дистальному кінці хромосоми IX [22].

Ry_{chc} забезпечує екстремальну стійкість у рослин картоплі до штамів PVY^o, PVY^{N:O} та PVY^{NTN}. Визначено, що Ry_{chc} кодує білок TIR-NLR [23], який відповідає за імунітет рослини.

Ідентифікація стійких сортів і створення стійких ліній дозволить зменшити ступінь економічної шкоди, що наноситься вірусами та іншими хворобами насадженням картоплі у польових умовах. Тому метою нашої роботи було визначення сортів-носіїв генів стійкості як кандидатів до подальшого селекційного процесу.

Матеріали і методи. Досліджували зразки картоплі різного походження з колекції Устимівської дослідної станції рослинництва Інституту рослинництва ім. Юр'єва НААН. Листя відбирали з дорослих рослин картоплі, вирощених на дослідних ділянках Устимівської станції рослинництва. Листя зберігали в морозильній камері.

ДНК виділяли з листя або бульб картоплі з використанням комерційного набору на основі силікагелю NeoPrep_100 (ТОВ «Неоген», Україна) відповідно до рекомендацій виробника (http://neogene.com.ua/index.php?route=product/product-&path=18_46&product_id=192). ДНК зберігали в холодильнику при 4°C.

Для ідентифікації Ry_{chc} використовували молекулярний маркер RY1648F24/R22 [25]. Послідовності використаних у роботі праймерів наведено у таблиці 1.

Гени стійкості до PVY Ry_{sto}

1. Послідовності молекулярних праймерів, використаних у роботі для аналізу зразків

Ген	Маркер	Послідовність (5'-3')	Довжина продукту ампліфікації, п.н.	Посилання
Ry_{adg}	RYSC3	5'-ATACACTCATCTAAATTGATGG-3' 5'-AGGATATACGGCATCATTTTCCGA-3'	321	(Kasai et al, 2000) [24].
Ry_{chc}	RY1648 F24/R22	5'-ACAACCTCCCTAGTATAAAGATGATCGA-3' 5'-GTATAACAGATGGATCCCTATCTCTTTACAAC-3'	594	(Akai et al 2023) [25].
Ry_{sto}	YES3A	5'-TAACTCAAGCGGAATAACCC-3' 5'-AATTCACCTGT TTACATGCTTCTGTG-3'	341	(Song and Schwarzscher, 2008) [21].

та Ry_{adg} за маркерами YES3-A та RYSC3 відповідно ідентифікували за допомогою полімеразно-ланцюгової реакції (ПЛР). Для проведення ПЛР використовували суміш PCR MIX 2x HOT (ТОВ «Неоген», Україна), що містить Taq ДНК-полімерази гарячого старту, dNTPs, MgCl₂, та реакційний буфер, згідно з рекомендаціями виробника (http://neogene.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=87). ПЛР здійснювали в 20 мкл реакційної суміші на термоциклері Applied Biosystems 2720 Thermal Cycler. Електрофорез проводили в агарозному 1,5% гелі. В якості барвника був бромистий етидій (10%).

Умови ПЛР з маркером RY1648F24/R22 відповідали методиці [26], але було підвищено температуру відпалу до 64°C. Режим ампліфікації був таким: початкова денатурація 10 хв при 94°C, 35 циклів (денатурація 94°C, 30 с, відпал 64°C, 30 с, елонгація 72°C впродовж 1 хв, фінальна елонгація 7 хв при 72°C). Наявність гена стійкості Ry_{chc} припускали, коли в результаті

ПЛР отримували продукт ампліфікації розміром близько 594 п.н.

Для молекулярного маркера RYSC3 ПЛР здійснювали за відповідним протоколом [24]: початкова денатурація 10 хв при 95°C, 35 циклів (денатурація протягом 45 с при 94°C, відпал протягом 45 с при 60°C, елонгація протягом 1 хв при 72°C), фінальна елонгація протягом 5 хв при 72°C. Маркером наявності гена Ry_{adg} слугував продукт ампліфікації розміром близько 321 п.н.

Для маркера YES3-A ПЛР здійснювали за протоколом: 10 хв при 95°C, 10 циклів денатурація 40 с при 94°C, відпал 40 с при 55°C і елонгація 60 с при 72°C, 30 циклів денатурація 40 с при 94°C, відпал 40 с при 53°C, фінальна елонгація 5 хв при 72°C [21], очікуваний продукт ампліфікації 341 п.н.

Результати і обговорення. Досліджено 68 сортів картоплі на ген стійкості до PVY Ry_{chc} з використанням прямого молекулярного маркера RY1648F24/R22 [25, 26]. Приклад електрофореграми з цим маркером наведено на рисунку, де у випадку наяв-

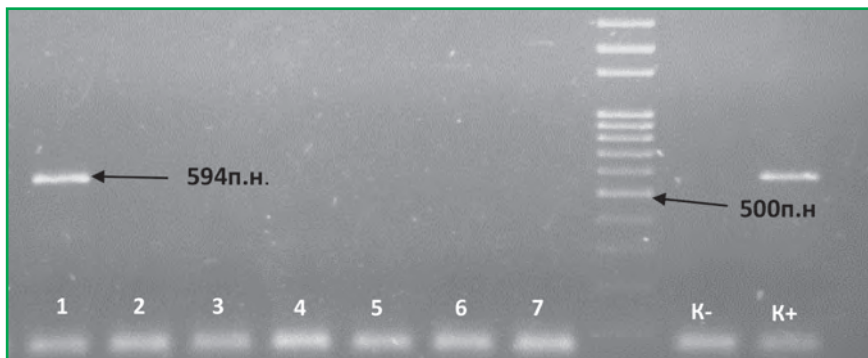


Рис. Визначення наявності гена стійкості Ry_{chc} у сортах картоплі (колекція Устимівської дослідної станції рослинництва) з використанням молекулярного маркера RY1648F24/R22: 1 — Пост-86; 2 — Древлянка; 3 — Віра; 4 — Скарбниця; 5 — Поляна; 6 — Дубрава; 7 — Слuch

ності гена присутній фрагмент завдовжки 594 п.н. За результатами ПЛР маркерні амплікони гена стійкості Ry_{chc} виявлено у 11-ти сортах, що становить 16,2% дослідженої вибірки (табл. 2). Це українські сорти: Гірсько-Карпатська, Західний, Авангард, Пост-86, Білявка, Красень, Зоряна, Альянс, Ракурс та іноземної селекції: Rosamunda (Німеччина), Apache (Велика Британія).

Точність виявлення зразків за прямим маркером $RY1648F24/R22$ [25] є вищою, ніж з використанням непрямого маркера $Ry186$ [27]. Як позитивний контроль використовували селекційну лінію Інституту картоплярства, селекційний номер П.17.21/36, походження 12.48-22/Сонцедар.

Для виявлення гена Ry_{adg} проаналізовано 58 зразків картоплі з використанням молекулярного

маркера $RYSC3$ (табл. 2). У результаті аналізу знайдено одного носія гена — сорт Ресурс. Відповідно, частота трапляння цього гена у дослідженій вибірці — 1,72%. Як позитивний контроль використовували сорт Ківі.

На предмет наявності гена стійкості Ry_{sto} проаналізовано 34 зразки картоплі з використанням молекулярного маркера $YES3-A$ (табл. 2). За цим маркером п'ять

2. Результати аналізу сортів картоплі на предмет наявності генів стійкості до PVY методом ПЛР (колекція Устимівської дослідної станції рослинництва)

№ п/н	Сорт	Походження	$RY1648F24/R22$ (Ry_{chc})	$RYSC3$ (Ry_{adg})	$YES3-A$ (Ry_{sto})
1	Toskana	Україна	-	-	-
2	Bonus	Німеччина	-	-	-
3	Kuroda	Нідерланди	-	-	-
4	Мирослава	Україна	-	-	-
5	Panda	Німеччина	-	-	-
6	Левада	Україна	-	-	-
7	Romanze	Німеччина	-	-	-
8	Verdi	Німеччина	-	-	-
9	Laperla	Нідерланди	-	-	-
10	Queen Anna	Німеччина	-	-	-
11	Raja	Нідерланди	-	-	-
12	Owacja	Польща	-	-	+
13	Предслава	Україна	-	-	-
14	Natasha	Німеччина	-	-	-
15	Гурман	Україна	-	-	+
16	Місцева з Татарстану	Татарстан	-	-	-
17	Rosamunda	Німеччина	+	-	-
18	Галичанка	Україна	-	-	*
19	Banana	Нідерланди	-	-	*
20	Aralia	(немає інфо)	-	-	*
21	Excelent	Нідерланди	-	-	*
22	Marfona	Нідерланди	-	-	*
23	Гірсько-Карпатська	Україна	+	-	*
24	Дорогинь	Україна	-	-	*
25	Apache	Велика Британія	+	-	*
26	Вересівка	Україна	-	-	*
27	Evolution	Нідерланди	-	-	*
28	Глазурна	Україна	-	-	*
29	Рання Роза	Україна	-	-	*
30	Barbara	Німеччина	-	-	*
31	Lady Claire	Нідерланди	-	-	*
32	Дубравка	Україна	-	-	*
33	Західний	Україна	+	-	*
34	Пишна	Україна	-	-	*
35	Зразок з Америки	Америка	-	-	*

№ п/н	Сорт	Походження	$RY1648F24/R22$ (Ry_{chc})	$RYSC3$ (Ry_{adg})	$YES3-A$ (Ry_{sto})
36	Славутич	Україна	-	-	*
37	Ekzotyк	Нідерланди	-	-	*
38	Maritta	Нідерланди	-	-	*
39	Дівоча	Україна	-	-	*
40	Забава	Україна	-	-	*
41	Косівщинська	Україна	-	-	*
42	Ресурс	Україна	-	+	+
43	Оберіг	Україна	-	-	-
44	Авангард	Україна	+	-	-
45	Загадка	Україна	-	-	-
46	Пост-86	Україна	+	-	-
47	Древлянка	Україна	-	-	-
48	Віра	Україна	-	-	-
49	Скарбниця	Україна	-	-	+
50	Поляна	Україна	-	-	-
51	Дубрава	Білорусь	-	-	-
52	Случ	Україна	-	*	-
53	Білявка	Україна	+	-	-
54	Ластівка	Україна	-	-	-
55	Завія	Україна	-	-	+
56	Предслава	Україна	-	-	-
57	Natasha	Німеччина	-	-	-
58	Alladin	Нідерланди	-	-	-
59	Дніпрянка	Україна	-	-	*
60	Rohana	Німеччина	-	*	*
61	Білявка	Україна	-	*	*
62	Красень	Україна	+	*	*
63	Немішаєвська 100	Україна	-	*	*
64	Зоряна	Україна	+	*	*
65	Звездаль	Україна	-	*	*
66	Лілея	Україна	-	*	*
67	Альянс	Україна	+	*	*
68	Ракурс	Україна	+	*	*

Примітка: + — присутність гена стійкості;
 - — відсутність гена стійкості;
 * — реакцію не здійснювали

зразків ідентифіковані як позитивні. Маркер гена *Ry_{sto}* виявлено у сортах Скарбниця, Ресурс, Завія, Гурман української селекції та у сорту Овася (Польща). Частота трапляння цього гена у вибірці становила 14,7%. Як позитивний контроль відібрано український сорт Слов'янка. Зауважимо, що у сорту Ресурс виявлено поєднання генів стійкості *Ry_{sto}* та *Ry_{adg}*.

В літературі описано випадки хибнопозитивних результатів молекулярної ідентифікації генів екстремальної стійкості у картоплі [28, 29], що, в першу чергу, пов'язано з використанням непрямих маркерів, які знаходяться на деякій відстані від власне гена стійкості. Наприклад, ми виявили випадок незбігу результатів польового та молекулярного дослідів у сорту Либідь, який мав маркер гена, визначений молекулярним маркером *Ry186*, але в польових умовах він був нестійким [29]. Тому оптимальним є застосування прямих маркерів, де ампліфікується фрагмент послідовності гена екстремальної стійкості, що стає можливим після клонування відповідного гена. Прямий маркер *RY1648F24/R22* було розроблено в 2023 р. після клонування гена *Ry_{chc}*. Результати ідентифікації гена стійкості у зразків з цим маркером є високо вірогідними [23]. На основі картування гена *Ry_{chc}* розроблено інший молекулярний маркер *MG64-17* для маркер-асистованої селекції стійкості до PVY [23].

У випадку непрямих маркерів підходом до підвищення точності аналізів щодо ідентифікації генів екстремальної стійкості до вірусу з молекулярними маркерами є застосування комбінації маркерів. Наприклад, в австралійській колекції зразків картоплі маркер гена *Ry_{adg}* *RYSC3* виявили у трьох сортів, але маркер *M45* був ампліфікованим у дев'яти додаткових сортах [28].

В останні десятиліття в Україні спостерігається посилення шкідливості вірусних хвороб в агроценозі картоплі, які завдають значного економічного збитку — їхня частка становить 31,0% [30]. Щорічні втрати Європейського Союзу через PVY оцінюються у

187 млн євро, головним чином через витрати на хімічну обробку, що застосовується під час вирощування насінневої картоплі, та втрати врожаю насінневої, промислової і споживчої картоплі [31]. Тому створення та культивування сортів картоплі генами екстремальної стійкості до PVY є ефективним екологічно безпечним способом уникнення втрат від цього патогена. Ідентифіковані у даному дослідженні сорти картоплі можуть бути використані як джерело генів стійкості в селекції.

ВИСНОВКИ

Ідентифіковано низку носіїв генів екстремальної стійкості до PVY. За допомогою прямого маркера *RY1648F24/R22* ідентифіковано ген *Ry_{chc}* у 11-ти сортах картоплі, а за маркерами генів *RYSC3* (*Ry_{adg}*) та *YES3-A* (*Ry_{sto}*) — у 1 та 5 сортів відповідно. Сорт Ресурс мав поєднання маркерів генів *Ry_{sto}* та *Ry_{adg}*.

Результати даного дослідження вказують на важливість молекулярної ідентифікації носіїв генів екстремальної стійкості як серед сортів так і серед селекційних ліній для підвищення частки стійких сортів в українському генофонді картоплі.

Фінансування. Дослідження виконано за фінансової підтримки в рамках проекту НФДУ № 2023.03/0244 «Механізми стійкості економічно важливих культур до вірусних хвороб в умовах воєнного стану та глобального потепління» за конкурсом «Передова наука в Україні».

Конфлікт інтересів. Авторі декларують відсутність конфлікту інтересів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Baebler Š., Coll A., Gruden K. Plant molecular responses to Potato Virus Y: A continuum of outcomes from sensitivity and tolerance to resistance. *Viruses*. 2020. 12(2):217. <https://doi.org/10.3390/v12020217>
2. Lacomme C., Jacquot E. General characteristics of potato virus Y (PVY) and



Сорт Ластівка, уражений PVY (фото автора)



Сорт Левада, уражений вірусними інфекціями (фото автора)

its impact on potato production: An Overview ; In: Lacomme C, Glais L, Bellstedt, D et al (eds). Potato virus Y: biodiversity, pathogenicity, epidemiology, and management. Springer. Cham. 2017a:1-19. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58860-5_1

3. Lacomme C., Pickup J., Fox A. et al. Transmission and epidemiology of Potato virus Y. Potato virus Y: biodiversity, pathogenicity, epidemiology and management. 2017b:141-176. DOI: 10.1007/978-3-319-58860-5_6

4. da Silva W., Kutnjak D., Xu Y. et al. Transmission modes affect the population structure of potato virus Y in potato. PLoS Pathogens. 2020;16(6):e1008608. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1008608>

5. Kumar R.R., Ansar M., Rajani K. et al. First report on molecular basis of potato leaf roll virus (PLRV) aggravation by combined effect of tuber and prevailing aphid. BMC Research Notes. 2020;13:523. <https://doi.org/10.1186/s13104-020-05370-1>

6. Hegde K., Kalleshwaraswamy C.M., Venkataravanappa V. Role of virus infection in seed tubers, secondary spread and insecticidal spray on the yield of potato in Deccan Plateau, India. Potato Research. 2021;64:339-351. DOI: 10.1007/s11540-020-09480-y

7. MacKenzie T.D.B., Nie X., Bisht V., Singh M. Proliferation of recombinant PVY strains in two potato-producing regions of Canada, and symptom expression in 30 important potato varieties with different PVY strains. Plant Disease. 2019;103(9):2221-2230. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-18-1564-RE>

8. Green K.J., Brown C.J., Gray S.M., Karasev A.V. Phylogenetic study of recombinant strains of Potato virus Y. Virology. 2017;507:40-52. <https://doi.org/10.1016/j.virol.2017.03.018>

9. Gray S.M., Power A.G. Anthropogenic influences on emergence of vector-borne plant viruses: The persistent problem of Potato virus Y. Current Opinion in Virology. 2018;33:177-183. DOI: 10.1016/j.coviro.2018.10.002

10. Steinhauer D.A., Domingo E., Holland J.J. Lack of evidence for proofreading mechanisms associated with an RNA virus polymerase. Gene. 1992;122(2):281-288.

11. Gibbs A., Ohshima K. Potyviruses and the digital revolution. Annual Review of Phytopathology. 2010;48(1):205-223. DOI: 10.1146/annurev-phyto-073009-114404

12. Gray S., De Boer S., Lorenzen J. et al. Potato virus Y: An Evolving Concern for Potato Crops in the United States and Canada. Plant Disease. 2010;94(12):1384-1397. <https://doi.org/10.1094/PDIS-02-10-0124>

13. Gibbs, Hajizadeh, Ohshima, Jones. The Potyvirus: An Evolutionary Synthesis Is Emerging. Viruses. 2020;12(2):132. DOI: 10.3390/v12020132

14. Cooper J.I.; Jones A.T. The use of terms for responses of plants to viruses: a reply to recent proposals. Phytopathology. 1984;73:127-128.

15. Valkonen J.P.T., Jones R.A.C., Slack S.A., Watanabe K.N. Resistance specificities to viruses in potato: Standardization of nomenclature. Plant Breeding. 1996;115:433-438. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1996.tb00952.x>

16. Solomon-Blackburn R.M., Barker H. A review of host major-gene resistance to potato viruses X, Y, A and V in potato: genes, genetics and mapped locations. Heredity. 2001;86(Pt 1):8-16. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2540.2001.00798.x>

17. Valkonen J.P. Elucidation of virus-host interactions to enhance resistance breeding for control of virus diseases in potato. Breed Sci-

ence. 2015;65(1):69-76. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.65.69>

18. Ross B.T., Zidack N.K., Flenniken M.L. Extreme resistance to viruses in potato and soybean. Frontiers in Plant Science. 2021;12:658981. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2021.658981>

19. Davie K., Holmes R., Pickup J., Lacomme C. Dynamics of PVY strains in field grown potato: Impact of strain competition and ability to overcome host resistance mechanisms. Virus Research. 2017;241:95-104. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2017.06.012>

20. Hämäläinen J.H., Watanabe K.N., Valkonen J.P. et al. Mapping and marker-assisted selection for a gene for extreme resistance to potato virus Y. Theoretical and Applied Genetics. 1997;94:192-197.

21. Song Y.S., Schwarzfischer A. Development of STS markers for selection of extreme resistance (Ry sto) to PVY and maternal pedigree analysis of extremely resistant cultivars. Am. J. Pot. Res. 2008;85:159-170. <https://doi.org/10.1007/s12230-008-9012-8>

22. Sato M., Nishikawa K., Komura K., Hosaka K. Potato virus Y resistance gene, Rychc, mapped to the distal end of potato chromosome 9. Euphytica. 2006;149:367-372. <https://doi.org/10.1007/s10681-006-9090-y>

23. Li G., Shao J., Wang Y. et al. Rychc confers Extreme Resistance to Potato virus Y in Potato. Cells. 2022;11(16):2577. <https://doi.org/10.3390/cells11162577>

24. Kasai Y., Morikawa Y., Sorri V.A. et al. Development of SCAR markers to the PVY resistance gene Ryadg based on a common feature of plant disease resistance genes. Genome. 2000;1:1-8. DOI:10.1139/GEN-43-1-1

25. Akai K., Asano K., Suzuki C. et al. De novo genome assembly of the partial homozygous dihaploid potato identified PVY resistance gene (Rychc) derived from *Solanum chacoense*. Breeding Science. 2023;73(2):168-179. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.22078>

26. Asano K., Endelman J. Development of KASP markers for the potato virus Y resistance gene Rychc using whole-genome resequencing data. Zenodo. 2023. DOI: 10.1101/2023.12.20.572658

27. Mori K., Sakamoto Y., Mukojima N. et al. Development of a multiplex PCR method for simultaneous detection of diagnostic DNA markers of five disease and pest resistance genes in potato. Euphytica. 2011;180:347-355. <https://doi.org/10.1007/s10681-011-0381-6>

28. Slater A.T., Schultz L., Lombardi M. Screening for resistance to PVY in Australian potato germplasm. Genes (Basel). 2020;11(4):429. <https://doi.org/10.3390/genes11040429>

29. Gadzalo Y.M., Kyrychenko S.O., Bondus R.O., Kozub N.O. Molecular identification of extreme resistance genes to PVY among breeding lines and potato varieties of Ukrainian origin. Agricultural Science and Practice. 2024;11(1):3-13. <https://doi.org/10.15407/agrisp11.01.003>

30. Бородай В.В., Парфенюк А. Поширення та розвиток основних хвороб картоплі (*Solanum tuberosum* L.) в Україні. Агрокологічний журнал. 2018;4:82-87.

31. Dupuis B., Nkuriyongoma P., Ballmer T. Economic impact of Potato virus Y (PVY) in Europe. Potato Research. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11540-023-09623-x>

¹Kyrychenko S.,

ORCID: 0000-0002-4325-4022

¹Borzykh O.,

ORCID: 0000-0002-9802-5622

²Bondus R.,

ORCID: 0000-0002-2367-5225

¹Sozinov I.,

ORCID: 0000-0002-3621-5746

³Mishchenko L.,

ORCID: 0000-0003-0697-6971

¹Kozub N.,

ORCID: 0000-0002-3572-1786

¹Institute of Plant Protection of the NAAS, 33, Vasylykivska str., Kyiv, 03022, Ukraine

²Ustymivka experimental station of Yuriev Plant production Institute of NAASU, 15, Acad. Vavyllova, Ustymivka, Poltava region, 39074, Ukraine

³Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64/13, Volodymyrska str., Kyiv, 01601, Ukraine

Molecular identification of *Ry_{adg}*, *Ry_{chc}* and *Ry_{sto}* resistance genes to potato virus Y in potato collection samples

Goal. Screening of a collection of potato varieties using the polymerase chain reaction (PCR) method for the presence of three genes that provide extreme resistance (ER) to Potato virus Y (PVY) namely *Ry_{adg}*, *Ry_{chc}* and *Ry_{sto}*. **Methods.** DNA was extracted from the leaves or tubers of potato varieties of Ukrainian and foreign origin using a silica-based method. The following primers were used to identify the genes: *RY1648F24/R22* for the gene *Ry_{chc}*, *YES3-A* for the *Ry_{sto}* gene, and *RYSC3* for *Ry_{adg}*. The amplified products were analyzed by agarose gel electrophoresis. **Results.** Ukrainian varieties were studied for the first time using the direct molecular marker *RY1648F24/R22*. Sixty-eight samples of different origins were analyzed for this molecular marker of the *Ry_{chc}* gene, and the gene of interest was identified in 11 varieties. Using the *YES3-A* molecular marker, 34 potato samples were evaluated and the *Ry_{sto}* gene marker amplicon was detected in 5 samples. Among the 58 potato varieties analyzed, the *Ry_{adg}* gene was detected by the *RYSC3* marker only in the Resurs variety, which also had the *Ry_{sto}* gene marker. **Conclusions.** The presence of genes of extreme resistance to PVY, *Ry_{adg}*, *Ry_{chc}*, and *Ry_{sto}* was detected in 16 Ukrainian and foreign potato varieties. The Resurs variety has a combination of *Ry_{adg}* and *Ry_{sto}* genes. The varieties carrying the ER genes identified during the study as carriers of genes for extreme resistance to PVY can be used in the breeding process.

Solanum tuberosum; diseases; *Ry_{adg}*; *Ry_{chc}*; potyvirus Y; *Ry_{sto}*; *RYSC3*; *RY1648F24/R22*

Надійшла до редакції: 29.09.2025

Прийнята до друку: 23.10.2025

Надруковано й опубліковано онлайн: грудень 2025