

КОМБІНАЦІЙНА ЗДАТНІСТЬ НОВИХ ЛІНІЙ РОЗЛУСНОЇ КУКУРУДЗИ (*ZEA MAYS EVERTA STURT.*)

КУПРІЧЕНКОВ Д.С. – аспірант

orcid.org/0000-0003-0543-0686

Державна установа «Інститут зернових культур

Національної академії аграрних наук України»

Постановка проблеми. Ефективність селекційної роботи з розлусною кукурудзою (*Zea mays everta Sturt.*) залежить, найперше, від достатньої кількості елітних ліній, які залучаються до програми створення конкурентоспроможних гібридів з високими технологічними показниками зерна. Мірилом цінності лінії є її комбінаційна здатність, тобто здатність батьківських компонентів поєднуватися один із одним у гібридах так, щоби бажані гени, або ознаки передавалися їхнім нащадкам. Комбінаційна здатність – це оцінка цінності генотипів на основі продуктивності їхнього потомства в певній моделі схрещування [1]. Визначення комбінаційної здатності ліній розлусної кукурудзи за врожайністю і об'ємним розширенням зерна дасть змогу виявити зразки, які поєднують у своєму геномі ці важливі ознаки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розрізняють загальну і специфічну комбінаційну здатність. Загальна комбінаційна здатність (ЗКЗ) характеризує середню величину гетерозису в гібридах, створених за участю певної лінії, а специфічна (СКЗ) – виражає відхилення від середньої величини в конкретній комбінації [2]. Загальна комбінаційна здатність – результат активності генів, які значною мірою є адитивними за своїми ефектами, тоді, як специфічна комбінаційна здатність – це наслідок внутрішньоалельної взаємодії генів (домінування) і міжалельної взаємодії генів (епістаз) [3]. Крім домінування і епістазу специфічна комбінаційна здатність є результатом взаємодії генотипу з навколишнім середовищем [4]. Врожайність зерна є полігенно контролюваною ознакою і залежить від великої кількості інших споріднених ознак [5]. Немає єдиної думки щодо її генетичного контролю. Вплив адитивних генних ефектів на врожайність кукурудзи показано в працях Makumbi D. та ін. [6] і Vadu-Aragu V. та ін. [7], тоді, як більшість авторів повідомляють про важливість неадитивних генних ефектів [8–10].

Зерно розлусної кукурудзи має характерну особливість – нагріваючись до певної температури воно розлускається і перетворюється на пухнасті, хрусткі, білі, або кремові об'ємні пластівці (flakes), які називаються попкорн, або «повітряна кукурудза» [11]. Здатність до розлуснення зумовлена будовою зернівки, яка майже повністю заповнена роговидним ендоспермом і покрита міцним оплодом. Коли зерно нагрівається вода, що міститься в гранулах крохмалю, перетворюється на пару. Спочатку оплодень стримує пару, але коли тиск та внутрішня температура підвищується до 930,79 кПа і 177 °С, відповідно, оплодень розривається і зернівка «вибухає», збільшуючись в об'ємі в декілька разів [12].

Об'ємне розширення зерна (popping expansion) – важливий технологічний показник розлусної кукурудзи. Він показує, який об'єм готової продукції можна одержати із заданої маси зерна й вимірюється в см³/г [13]. Об'ємне розширення зерна (ОРЗ) контролюється геномом, але його прояв залежить від багатьох чинників таких, як вологість зерна, цілісність оплодня, умови дозрівання і зберігання тощо [14–16]. Адитивні та неадитивні генні ефекти спостерігалися в успадкуванні ознаки «об'ємне розширення зерна» [17–19]. Santos T. D. O. та ін. довели, що в разі схрещування розлусної кукурудзи з кременистою об'ємне розширення зерна контролювалося двома типами успадкування: основний адитивний ген у поєднанні з адитивними та домінантними полігенами (змішане успадкування), а в іншому випадку – лише адитивні та домінантні полігени [20]. Водночас за даними деяких авторів [8, 21, 22] врожайність зерна має обернений кореляційний зв'язок з об'ємним розширенням зерна.

Успадкованість – це та частина мінливості певної ознаки, яка контролюється спадковими чинниками. Розрізняють успадкованість у широкому (H_2) та вузькому розумінні (h_2). У першому випадку, це частка загальної фенотипової мінливості, яка зумовлена, як адитивною дією генів, так і впливом домінування, наддомінування, епістазу та плейотропії [23]. А той же час, успадкованість у вузькому розумінні – це тільки та частина загальної мінливості, яка детермінується адитивною дією генів. У селекційних програмах особливе значення має коефіцієнт h_2 , оскільки дає змогу прогнозувати ефективність добору. Коефіцієнт успадкованості може виражатися у відсотках, або в частках одиниці. Якщо величина коефіцієнта $h^2 \geq 0,40$, то говорять про високий ступінь успадкованості; $0,39 \geq h^2 \leq 0,20$ – середній ступінь успадкованості, а $h^2 \leq 0,19$ – низький. За даними Clóvis L. R та ін. [24], успадкованість у широкому сенсі для врожайності й об'ємного розширення зерна дорівнювала $0,5208 \pm 0,0229$ та $0,6356 \pm 0,0209$, відповідно, а у вузькому сенсі – $0,3290 \pm 0,0292$ та $0,3083 \pm 0,0298$, відповідно. Про високий вплив генетичних чинників на мінливість врожайності й об'ємного розширення зерна повідомляють Bhadru D. та ін. [25].

Мета. Виявити лінії розлусної кукурудзи з високою комбінаційною здатністю за ознаками «врожайність» і «об'ємне розширення зерна» та встановити характер успадкування цих ознак.

Матеріал та методика досліджень. Вихідним матеріалом для проведення досліджень були обрані 46 ліній розлусної кукурудзи, створених у лабораторії селекції

кукурудзи харчового напрямку використання ДУ Інститут зернових культур НААН України на базі інтродукованих сортів і гібридів – Snow Puff Popcorn F₁ (Сніжний попкорн), Creme Puff Corn F₁ (Кремовий попкорн), Japanese Hulless White Popcorn (Японський білий безплівчастий попкорн), Pick and Pop Popcorn F₁ (Попкорн «Пік і Поп»), Red River Valley Popcorn (Попкорн «Долина червоної ріки»), Wisconsin White Birch Popcorn (Вісконсин білий березовий попкорн) та матеріалу із закритим родоходом.

Для визначення комбінаційної здатності ліній розлусної кукурудзи були проведені схрещування із 4 тестерами – простими гібридами Шанс, Веселка, ДН Циклон та Корал. Гібриди Шанс і ДН Циклон занесені до Реєстру сортів рослин придатних для поширення в Україні і слугують, відповідно, стандартами середньоранньої і середньостиглої груп стиглості.

Дослідження проводилися протягом 2021–2022 рр. на Синельниківській селекційно-дослідній станції ДУ Інститут зернових культур НААН України. Агротехніка проведення досліджень – загальноприйнята для зони Північного Степу. Площа ділянки – 8,4 м², повторність трикратна. Посів гібридів розлусної кукурудзи здійснювали селекційною сівалкою, а збір врожаю – комбайном „Wintersteiger Delta”. Отримані результати зводили до стандартної 14 % вологості зерна.

Для визначення технологічних показників зерна гібридів розлусної кукурудзи проводили штучне запилення 3 качанів сумішшю пилку з ділянки. Після настання 18 % вологості зерна, качани збирали й досушували в добре провітрюваному приміщенні за температури 20–22 °С. Обмолочували вручну й опісля об'єднували зерно в межах однієї ділянки.

Розлуснення кукурудзи відбувалося із допомогою апарату Clatronіc PM 3635 потужністю 1200 Вт. Для створення однакових температурних умов, кожний наступний зразок засипався через 15 хв після закінчення процесу розлуснення попереднього. Використовували 2 наважки вагою 10 г. Об'єм попкорну вимірювався градуїтованим циліндром на 1000 см³. Об'ємне розширення зерна (ОРЗ) розраховували за формулою:

$$\text{ОРЗ} = \frac{V}{m},$$

де V – об'єм попкорну (см³); m – маса зерна до розлуснення (г).

Математичну обробку даних проводили на персональному комп'ютері з використанням спеціальних прикладних програм Microsoft Office Excel (Statistica). Статистичну достовірність експериментальних даних розраховували за Літуном П. П. та ін. [26].

У 2021 р. склалися дуже сприятливі гідротермічні умови для вирощування розлусної кукурудзи. З травня по серпень випало 381 мм опадів, що становить 282 % від середніх багаторічних даних, а середньомісячна температура повітря перевищувала норму в липні на 1,3 °С, а в серпні – на 1,2 °С. На противагу попередньому, 2022 р. був несприятливим для кукурудзи. У травні – липні було холодніше, ніж зазвичай, а недобір волиги за ці місяці становив 66 мм, або 50 % від норми. Лише в серпні температура повітря підвищилася до 23,9 °С і пройшли сильні зливи.

Результати досліджень. У результаті проведених досліджень було встановлено, що гібриди розлусної кукурудзи мали статистично достовірні відмінності за врожайністю і об'ємним розширенням зерна. У табл. 1 наведені параметри варіювання ознак у гібридів розлусної кукурудзи.

Середнє значення врожайності в сприятливому за погодними умовами 2021 р. перевищувало відповідний показник у посушливому 2022 р. в 1,6 раз, тоді, як середнє значення об'ємного розширення зерна було однаковим. Вплив умов вирощування на формування врожайності становив 57,2 %, генотипу гібриду – 24,4 %, а взаємодії – 15,3 %. Мінливість об'ємного розширення зерна на 68,0 % залежала від генотипу гібриду, на 28,4 % – від взаємодії «рік x гібрид» і лише на 0,4 % – від року. У 2021 р. 24,7 % тесткросних гібридів достовірно перевищували врожайність стандарту Шанс, а 15,9 % – стандарту ДН Циклон, тоді, як у 2022 р. – 2,4 % і 15,3 %, відповідно. Гібриди розлусної кукурудзи продемонстрували високі показники й за об'ємним розширенням зерна. У перший

Таблиця 1

Параметри варіювання врожайності й об'ємного розширення зерна у гібридів розлусної кукурудзи, 2021–2022 рр.

Показники		2021 р.	2022 р.
Врожайність зерна, т/га	N, шт.	170	170
	$\bar{x} \pm ts_{\bar{x}}$	4,02±0,18	2,51±0,18
	min – max	2,36–5,82	1,25–4,21
	Шанс, ст.	3,93	3,24
	ДН Циклон, ст.	4,13	2,53
	HIP _{0,05}	0,50	0,50
Об'ємне розширення зерна, см ³ /г	N, шт.	170	170
	$\bar{x} \pm ts_{\bar{x}}$	44,6±0,89	44,1±0,80
	min – max	34,7–54,9	32,4–52,5
	Шанс, ст.	42,3	43,3
	ДН Циклон, ст.	45,8	49,7
	HIP _{0,05}	2,47	2,22

рік випробувань 48,8 % гібридів мали ОРЗ більше, ніж у Шансу, а 15,9 % – ніж у ДН Циклон. На другий рік ці показники зменшилися до 38,8 і 1,2 %, відповідно. Отже, гібриди розлусної кукурудзи, створені за участю нових ліній і тестерів Шанс, ДН Циклон, Веселка й Корал, мали високі потенціали врожайності й об'ємного розширення зерна. У 2021 р. висока загальна комбінаційна здатність за врожайністю зерна була в 14 ліній, або 30 %, а у 2022 р. – в 13 ліній, або 28 % (табл. 2).

У сумі за 2 роки високі значення ефектів ЗКЗ спостерігалися в 5 лініях із гібрида Сніжний попкорн, у 3 лініях із гібрида Кремовий попкорн та сорту Долина червоної ріки, у 2 лініях із гібрида Пік і Поп попкорн та в 6 лініях із закритим родоводом.

Стабільно високі значення ефектів ЗКЗ, незалежно від умов вирощування, були виявлені в таких лініях: РС 19, РК 72, РП 36, РР 6, РР 7, ІКР 11-3, ІКР 11-9 та ІКР 15-2. Високі та середні значення ефектів ЗКЗ у різні роки мали 9 ліній, тоді, як у лінії ІКР 2-1 оцінка ефек-

тів ЗКЗ із високої у 2021 р. впала до низької у 2022 р. На противагу представленим зразкам, стабільно низькі значення ефектів ЗКЗ за врожайністю зерна були в лінії РБ 3, РР 1, РВ 2, РВ 6 та ін., а низькі й середні ще в 14 лініях. У сумі за 2 роки, сорти Японський білий безплівчастий попкорн та Вісконсин білий березовий попкорн представили найбільшу кількість ліній із низькою ЗКЗ – 6 і 5 ліній, відповідно.

В особливу групу входять лінії із середніми значеннями ефектів ЗКЗ та високими варіантами СКС, оскільки дають високоврожайні гібридні комбінації з деякими тестерами. До цієї групи треба віднести лінії РК 48, РП 3 та ін. Ефекти загальної комбінаційної здатності за об'ємним розширенням зерна у 2021 р. варіювали від -0,44 до +0,43 см³/г, а у 2022 р. – від -0,43 до +0,55 см³/г. Стабільно високі значення ефектів ЗКЗ продемонстрували лінії РС 3, РК 7, РК 72, РП 72, ІКР 8-2, ІКР 36-3, ІКР 75-1; високі та середні – РС 5, РК 43, РК 48, РВ 7 та ін. (табл. 3).

Таблиця 2

Комбінаційна здатність деяких ліній розлусної кукурудзи за врожайністю зерна, 2021–2022 рр.

Походження	Лінія	Ефекти загальної комбінаційної здатності, см ³ /г		Варіанти специфічної комбінаційної здатності	
		2021 р.	2022 р.	2021 р.	2022 р.
Сніжний попкорн, F ₁	РС 3	-0,02	0,61	0,09	0,35
	РС 11	0,13	0,37	0,06	0,02
	РС 13	0,43	-0,15	0,22	0,04
	РС 19	0,60	0,70	0,05	0,29
Кремовий попкорн, F ₁	РК 25	0,73	0,04	0,63	0,01
	РК 32	0,07	0,35	0,35	-0,01
	РК 48	0,07	0,13	0,48	0,44
	РК 72	0,71	0,58	0,43	0,07
Японський білий безплівчастий попкорн	РБ 3	-1,23	-0,97	0,06	-0,01
	РБ 7	-0,67	-0,06	0,66	0,05
	РБ 18	-1,16	0,10	0,28	-0,01
	РБ 21	-0,50	-0,03	0,17	0,51
Пік і Поп попкорн, F ₁	РП 3	0,16	0,01	0,35	0,38
	РП 11	0,38	0,15	0,19	0,93
	РП 36	0,61	0,34	0,16	1,15
	РП 61	0,01	-0,42	0,30	0,27
Попкорн «Долина червоної ріки»	РР 1	-0,73	-0,61	0,36	0,03
	РР 4	0,60	0,10	0,47	0,07
	РР 6	0,64	0,28	0,07	0,17
	РР 7	0,37	0,32	0,10	0,12
Вісконсин білий березовий попкорн	РВ 1	0,11	-0,47	0,27	0,10
	РВ 2	-0,66	-0,71	0,53	0,03
	РВ 6	-0,45	-0,27	0,41	0,07
	РВ 13	-0,20	-0,35	0,42	0,11
Закритий родовід	ІКР 2-1	0,22	-0,33	0,59	0,01
	ІКР 11-3	0,20	0,27	0,33	0,15
	ІКР 11-9	0,59	0,52	0,59	0,12
	ІКР 15-2	0,55	0,26	0,52	0,11
–	НІР _{0,05}	0,18	0,18	–	–
–	Середнє	–	–	0,39	0,20

Таблиця 3

Комбінаційна здатність деяких ліній розлусної кукурудзи за об'ємним розширенням зерна, 2021–2022 рр.

Походження	Лінія	Ефекти загальної комбінаційної здатності, см ³ /г		Варіанси специфічної комбінаційної здатності	
		2021 р.	2022 р.	2021 р.	2022 р.
Сніжний попкорн, F ₁	PC 3	0,23	0,18	0,06	0,02
	PC 5	0,04	0,10	0,12	0,09
	PC 11	0,00	0,01	0,11	0,02
	PC 19	-0,23	0,13	0,12	0,29
Кремний попкорн, F ₁	PK 7	0,19	0,23	0,00	0,00
	PK 43	0,12	-0,07	0,14	0,17
	PK 48	0,03	0,19	0,05	0,00
	PK 72	0,29	0,23	0,24	0,46
Японський білий безплівчастий попкорн	PB 3	-0,04	-0,29	0,11	0,00
	PB 7	0,12	-0,07	0,41	0,10
	PB 9	-0,01	0,13	0,02	0,15
	PB 12	-0,06	0,21	0,01	0,02
Пік і Поп попкорн, F ₁	PP 3	0,12	0,18	0,18	0,06
	PP 60	0,04	0,31	0,33	0,09
	PP 61	-0,09	0,29	0,04	0,08
	PP 72	0,25	0,55	0,01	0,09
Попкорн «Долина червоної ріки»	PP 1	-0,02	-0,22	0,26	0,20
	PP 2	0,24	-0,11	0,03	0,01
	PP 6	-0,10	-0,16	0,11	0,34
	PP 11	-0,42	-0,33	0,01	0,03
Вісконсин білий березовий попкорн	PB 1	-0,34	-0,31	0,27	0,08
	PB 2	0,09	0,08	0,01	0,00
	PB 6	0,21	-0,03	0,32	0,06
	PB 13	-0,25	-0,34	0,12	0,04
Закритий родовід	IKP 2-1	0,23	-0,09	-0,01	0,16
	IKP 8-2	0,43	0,24	0,19	0,20
	IKP 36-3	0,24	0,36	0,02	0,12
	IKP 75-1	0,26	0,33	0,02	0,02
-	HIP _{0,05}	0,10	0,08	-	-
-	Середнє	-	-	0,13	0,11

Аналізуючи походження ліній було встановлено, що найбільшу кількість зразків із високою ЗКЗ було виділено з гібридів Кремний попкорн та Пік і Поп попкорн – по 5 ліній; 3 лінії – із сорту Японський білий безплівчастий попкорн; 2 лінії – із гібриду Сніжний попкорн та по одній – із сортів Долина червоної ріки і Вісконсин білий березовий попкорн. Серед ліній із закритим родоводом 5 ліній мали високу ЗКЗ. Водночас найбільшу кількість ліній із низькою ЗКЗ представив сорт Долина червоної ріки – 6. Стабільною низькою ця ознака була в ліній PP 11, PB 1, PB 13 та ін. На рис. 1 показана відповідність ефектів ЗКЗ за врожайністю зерна ефектам ЗКЗ за об'ємним розширенням зерна.

У 2021 р. однакові значення оцінок ефектів ЗКЗ за двома ознаками мали 26 % ліній, а у 2022 р. – 37 % ліній. Водночас «високі й низькі», або «низькі і високі» ефекти ЗКЗ за врожайністю і об'ємним розширенням зерна були притаманні 39 % ліній. Лише в РК 72, створеної на базі гібриду Кремний попкорн, спостерігалися високі оцінки ефектів ЗКЗ за двома ознаками протягом

2 років, що робить її незамінною в разі створенні високоврожайних гібридів із високими технологічними показниками. У табл. 4 представлені коефіцієнти успадкованості ознак «врожайність зерна» і «об'ємне розширення зерна».

У 2021 р. і 2022 р. коефіцієнти успадкованості H² за ознакою «врожайність зерна» дорівнювали 0,88 та 0,81, а за ознакою «об'ємне розширення зерна» – 0,89 та 0,91, відповідно. Такі високі коефіцієнти успадкованості в широкому розумінні свідчать про істотний вплив генетичних чинників на мінливість ознак. Водночас вплив адитивних ефектів за першою ознакою був високий – 0,40 і 0,43, а за другою ознакою – середнім (0,35 і 0,37).

Особливо важливе значення для розуміння природи впливу на мінливість ознаки має різниця між коефіцієнтами успадкованості – H₂–h₂, яка відповідає за неадитивну дію генів. У нашому випадку, лише у 2022 р. за врожайністю зерна адитивні генні ефекти перевищували вплив неадитивних, тоді як об'ємне розширення зерна на 59–61 % контролюється неадитивною дією

Походження	Лінія	Ефекти загальної комбінаційної здатності			
		2021 р.		2022 р.	
		врожайність	ОРЗ	врожайність	ОРЗ
Сніжний попкорн, F ₁	РС 3				
	РС 5				
	РС 13				
	РС 19				
Кремовий попкорн, F ₁	РК 7				
	РК 25				
	РК 43				
	РК 72				
Японський білий безплівчастий попкорн	РБ 3				
	РБ 7				
	РБ 9				
	РБ 18				
«Пік і Поп» попкорн, F ₁	РП 11				
	РП 36				
	РП 60				
	РП 72				
Попкорн «Долина червоної ріки»	РР 1				
	РР 6				
	РР 7				
	РР 11				
Вісконсин білий березовий попкорн	РВ 1				
	РВ 2				
	РВ 6				
	РВ 13				
Закритий родовід	ІКР 2-1				
	ІКР 11-9				
	ІКР 15-2				
	ІКР 75-1				

Примітка:


	– висока ЗКЗ;		– середня ЗКЗ;		– низька ЗКЗ
---	---------------	---	----------------	---	--------------

Рис. 1. Ефекти ЗКЗ за врожайністю та об'ємним розширенням зерна

Таблиця 4

Успадковуваність ознак «врожайність зерна» та «об'ємне розширення зерна», 2021–2022 рр.

Коефіцієнти успадковуваності	Врожайність зерна		Об'ємне розширення зерна	
	2021 р.	2022 р.	2021 р.	2022 р.
У широкому розумінні, H ²	0,88	0,81	0,89	0,91
У вузькому розумінні, h ²	0,40	0,43	0,35	0,37
Вплив материнської форми, h ² _A	0,33	0,37	0,25	0,33
Вплив батьківської форми, h ² _B	0,07	0,06	0,10	0,04
H ₂ – h ₂	0,48	0,38	0,54	0,54

генів. Як видно з табл. 4, вплив материнських форм (тестерів) на успадковування був переважаючим: за врожайністю зерна – 82 % і 86 %, а за об'ємним розширенням зерна – 71 % та 89 %.

Висновки. Встановлено, що стабільно високі значення ефектів ЗКЗ за врожайністю зерна властиві лініям РС 19, РК 72, РП 36, РР 6, РР 7, ІКР 11-3, ІКР 11-9,

ІКР 5-2, а за об'ємним розширенням зерна – РС 3, РК 7, РК 72, РП 3, ІКР 36-3, ІКР 75-1. Доведено, що кращою за комбінаційною здатністю є лінія РК 72, отримана з гібриду Кремовий попкорн. Встановлено, що об'ємне розширення зерна контролюється неадитивною дією генів, тоді, як на врожайність впливають адитивні й неадитивні генні чинники.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Fasahat P., Rajabi A., Rad J. M. and Derera J. J. B. I. J. Principles and utilization of combining ability in plant breeding. *Biometrics & Biostatistics International Journal*. 2016. Vol. 4. No. 1. P. 1–24. DOI: 10.15406/bbij.2016.04.00085.
2. Ali Q., Ali A., Awan M. F., Tariq M. et al. Combining ability analysis for various physiological, grain yield and quality traits of *Zea mays* L. *Life Science Journal*. 2014. Vol. 11. No. 8s. P. 540–551. URL: <http://www.lifesciencesite.com>.
3. Henderson C. R. Specific and general combining ability. *Heterosis*. 1952. P. 352–370. Ames: Iowa State College Press.
4. Begna T. Combining ability and heterosis in plant improvement. *Open Journal of Political Science*. 2021. Vol. 6. No. 1. P. 108–117. DOI: 10.17352/ojps.
5. Romanus K. G., Hussein S. and Mashela W. P. Combining ability analysis and association of yield and yield components among selected cowpea lines. *Euphytica*. 2008. No. 162. P. 205–210. DOI: 10.1007/s10681-007-9512-5.
6. Makumbi D., Betran F. J., Banziger M. and Ribaut J. Combining ability, heterosis and genetic diversity in tropical maize (*Zea mays* L.) under stress and non-stress conditions. *Euphytica*. 2011. Vol. 180. No. 2. P. 143–162. DOI: 10.1007/s10681-010-0334-5.
7. Badu-Apraku B., Annor B., Oyekunle M., Akinwale R. O. et al. Grouping of early maturing quality protein maize inbreds based on SNP markers and combining ability under multiple environments. *Field Crops Research*. 2015. No. 183. P. 169–183. DOI: 10.1016/j.fcr.2015.07.015.
8. de Oliveira, A. L. B., Rodrigues C. S., da Silva G. A. P., Sawazaki E. et al. Combining ability and potential of S_1 popcorn progenies for early selection. *Acta Scientiarum. Agronomy*. 2022. No. 44. DOI: 10.4025/actasciagron.v44i1.55194.
9. Soni N. V., Khanorkar S. M., Shah A. K. and Talati J. G. Hybrid Vigour and Combining Ability for Yield and Quality Traits in Popcorn (*Zea mays* var. *everta*). *Indian Journal of Agricultural Biochemistry*. 2014. Vol. 27. No. 2. P. 188–192. URL: <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:ijab&volume=27&issue=2&article=016>
10. Dehghanpour Z. and Ehdai B. Stability of general and specific combining ability effects for grain yield in elite Iranian maize inbred lines. *Journal of Crop Improvement*. 2013. Vol. 27. No. 2. P. 137–152. DOI: 10.1080/15427528.2012.745822
11. Бєліков Є. І., Купріченко Т. Г. Перспективні гібриди розлусної кукурудзи. *Бюлетень ДУ Інституту сільськогосподарства степової зони НААН України*. 2016. № 11. С. 103–106.
12. Cañizares L. D. C. C., da Silva Timm N., Ramos A. H., Neutzling H. P. et al. Effects of moisture content and expansion method on the technological and sensory properties of white popcorn. *International Journal of Gastronomy and Food Science*. 2020. No. 22. 100282. DOI: 10.1016/j.ijgfs.2020.100282.
13. Hallauer A. R. Specialty corn: CRC Press LLC. 2001. P. 205–240. URL: <http://pustakapertanianub.staff.ub.ac.id/files/2012/12/Specialty-Corns.pdf>.
14. Kamphorst S. H., do Amaral Junior A. T., de Lima V. J., Santos P. H. et al. Comparison of selection traits for effective popcorn (*Zea mays* L. var. *everta*) breeding under water limiting conditions. *Frontiers in Plant Science*. 2020. Vol. 11. No. 1289. P. 1–18. DOI: 10.3389/fpls.2020.01289.
15. Vázquez-Carrillo M. G., Santiago-Ramos D. and de Dios Figueroa-Cárdenas J. Kernel properties and popping potential of Chapalote, a Mexican ancient native maize. *Journal of Cereal Science*. 2019. No. 86. P. 69–76. DOI: 10.1016/j.jcs.2019.01.010
16. D'Cross-Mason N. and Waldren R. P. G78-426 Popcorn Production. *Historical Materials from University of Nebraska-Lincoln Extension*. 1978. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/extensionhist/745>.
17. Schmitt K. F. M., Lima V. J., do Amaral Júnior A. T., Santos J. S. et al. Combining ability of popcorn lines for resistance to the fungus *Puccinia polysora* (Pucciniaceae). *Genetics Molecular Research*. 2019. Vol. 18. No. 3. DOI: 10.4238/gmr18330.
18. Jele P., Derera J. and Siwela M. Assessment of popping ability of new tropical popcorn hybrids. *Australian journal of crop science*. 2014. Vol. 8. No. 6. P. 831–839. URL: <https://www.researchgate.net/publication/288579325>.
19. Li Y. L., Dong Y. B., Niu S. Z. and Cui, D. Q. QTL for popping characteristics in popcorn. *Plant Breeding*. 2007. Vol. 126. No. 5. P. 509–514. DOI: 10.1111/j.1439-0523.2007.01372.
20. Santos J. S., de Souza Y. P., Vivas M., do Amaral Junior A. T. et al. Genetic merit of popcorn lines and hybrids multiple foliar diseases and agronomic properties. *Functional Plant Breeding Journal*. 2019. Vol. 2. No. 2. P. 33–47. DOI: 10.35418/2526-4117/v2n2a2.
21. Moterle L. M., Braccini A. L., Scapim C. A., Pinto R. J. B. et al. Combining ability of popcorn lines for seed quality and agronomic traits. *Euphytica*. 2012. Vol. 185. No. 3. P. 337–347. DOI: 10.1007/s10681-011-0458-2.
22. Arnhold E., Mora F., Silva R. G., Good-God P. I. and Rodvalho M. A. Evaluation of top-cross popcorn hybrids using mixed linear model methodology. *Chilean journal of agricultural research*. 2009. Vol. 69. No. 1. P. 46–53. DOI: 10.4067/S0718-58392009000100006.
23. Успадковуваність. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki>.
24. Clóvis L. R., Pinto R. J. B., Uhdre R. S., Rosa J. C., Zeni Neto, H., Vivas, M., & Amaral Júnior, A. T. D. (2021). Overall heritability in popcorn estimated by meta-analysis. *Acta Scientiarum. Agronomy*. 2021. Vol. 43. DOI: 10.4025/actasciagron.v43i1.53721
25. Bhadrū D., Mallaiah B., Swarnalatha V., Sreelatha D. et al. Study of genetic parameters for popping expansion ratio and yield traits in popcorn hybrids. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*. 2020. Vol. 2. No. 4. P. 671–674. URL: <https://www.researchgate.net/profile/MallaiahBedika/publication/349393486>.
26. Літун П. П., Кириченко В. В., Петренко В. П., Коломацька В. П. Системний аналіз в селекції польових культур: навч. посіб. Інститут рослинництва ім. В. Я. Юр'єва. Харків, 2009. 354 с.

REFERENCES:

1. Fasahat, P., Rajabi, A., Rad, J. M., & Derera, J. J. B. I. J. (2016). Principles and utilization of combining ability in plant breeding. *Biometrics & Biostatistics International Journal*, 4(1), 1–24. doi: 10.15406/bbij.2016.04.00085.

2. Ali, Q., Ali, A., Awan, M. F., Tariq, M. et al. (2014) Combining ability analysis for various physiological, grain yield and quality traits of *Zea mays* L. *Life Science Journal*, 11 (8s), 540–551. URL: <http://www.lifesciencesite.com>.
3. Henderson, C. R. (1952). Specific and general combining ability. *Heterosis*, 352–370. Ames: Iowa State College Press.
4. Begna, T. (2021). Combining ability and heterosis in plant improvement. *Open Journal of Political Science*, 6(1), 108–117. doi:10.17352/ojps.
5. Romanus, K. G., Hussein, S. & Mashela, W. P. (2008). Combining ability analysis and association of yield and yield components among selected cowpea lines. *Euphytica*, 162, 205–210. doi: 10.1007/s10681-007-9512-5.
6. Makumbi, D., Betran, F. J., Banziger, M., & Ribaut, J. (2011). Combining ability, heterosis and genetic diversity in tropical maize (*Zea mays* L.) under stress and non-stress conditions. *Euphytica*, 180(2), 143–162. doi:10.1007/s10681-010-0334-5.
7. Badu-Apraku, B., Annor, B., Oyekunle, M., Akinwale, R. O. et al. (2015). Grouping of early maturing quality protein maize inbreds based on SNP markers and combining ability under multiple environments. *Field Crops Research*, 183, 169–183. doi: 10.1016/j.fcr.2015.07.015.
8. de Oliveira, A. L. B., Rodrigues, C. S., da Silva, G. A. P., Sawazaki, E. et al. (2022). Combining ability and potential of S₁ popcorn progenies for early selection. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 44, e5519. doi: 10.4025/actasciagron.v44i1.55194.
9. Soni, N. V., Khanorkar, S. M., Shah, A. K., & Talati, J. G. (2014). Hybrid Vigour and Combining Ability for Yield and Quality Traits in Popcorn (*Zea mays* var. *everta*). *Indian Journal of Agricultural Biochemistry*, 27(2), 188–192. URL: <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:ijab&volume=27&issue=2&article=016>.
10. Dehghanpour, Z., & Ehdaie, B. (2013). Stability of general and specific combining ability effects for grain yield in elite Iranian maize inbred lines. *Journal of Crop Improvement*, 27(2), 137–152. doi: 10.1080/15427528.2012.745822.
11. Bielikov Ye. I., Kuprichenkova T. H. (2016). Perspektyvni hibrydy rozlusnoi kukurudzy. [Promising popcorn hybrids]. *Biuletyn DU Instytutu silskoho hospodarstva stepovoi zony NAAN Ukrainy*, 11. P. 103–106. [in Ukrainian].
12. Cañizares, L. D. C. C., da Silva Timm, N., Ramos, A. H., Neutzling, H. et al. (2020). Effects of moisture content and expansion method on the technological and sensory properties of white popcorn. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 22, 100282. doi:10.1016/j.ijgfs.2020.100282.
13. Hallauer, A. R. (2001). *Specialty corn*: CRC Press LLC, 205–240. URL: <http://pustakapertanianub.staff.ub.ac.id/files/2012/12/Specialty-Corns.pdf>.
14. Kamphorst, S. H., do Amaral Junior, A. T., de Lima, V. J., Santos, P. H. et al. (2020). Comparison of selection traits for effective popcorn (*Zea mays* L. var. *everta*) breeding under water limiting conditions. *Frontiers in Plant Science*, 11(1289), 1–18. doi:10.3389/fpls.2020.01289.
15. Vázquez-Carrillo, M. G., Santiago-Ramos, D., & de Dios Figueroa-Cárdenas, J. (2019). Kernel properties and popping potential of Chapalote, a Mexican ancient native maize. *Journal of Cereal Science*, 86, 69–76. doi:10.1016/j.jcs.2019.01.010.
16. D'Croz-Mason, N., & Waldren, R. P. (1978). G78-426 Popcorn Production. *Historical Materials from University of Nebraska-Lincoln Extension*. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/extensionhist/745>.
17. Schmitt, K. F. M., Lima, V. J., do Amaral Júnior, A. T., Santos, J. S. et al. (2019). Combining ability of popcorn lines for resistance to the fungus *Puccinia polysora* (Pucciniaceae). *Genetics Molecular Research*, 18 (3). doi: 10.4238/gmr18330.
18. Jele, P., Derera, J., & Siwela, M. (2014). Assessment of popping ability of new tropical popcorn hybrids. *Australian journal of crop science*, 8 (6), 831–839. URL: <https://www.researchgate.net/publication/288579325>.
19. Li, Y. L., Dong, Y. B., Niu, S. Z., & Cui, D. Q. (2007). QTL for popping characteristics in popcorn. *Plant Breeding*, 126(5), 509–514. doi: 10.1111/j.1439-0523.2007.01372.
20. Santos, J. S., de Souza, Y. P., Vivas, M., do Amaral Junior, A. T. et al (2019). Genetic merit of popcorn lines and hybrids multiple foliar diseases and agronomic properties. *Functional Plant Breeding Journal*, 2(2), 33–47. doi:10.35418/2526-4117/v2n2a2.
21. Moterle, L. M., Braccini, A. L., Scapim, C. A., Pinto, R. J. B. et al. (2012). Combining ability of popcorn lines for seed quality and agronomic traits. *Euphytica*, 185(3), 337–347. doi: 10.1007/s10681-011-0458-2.
22. Arnhold, E., Mora, F., Silva, R. G., Good-God, P. I., & Rodovalho, M. A. (2009). Evaluation of top-cross popcorn hybrids using mixed linear model methodology. *Chilean journal of agricultural research*, 69(1), 46–53. doi: 10.4067/S0718-58392009000100006.
23. Uspadkovuvanist. [Heritability]. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki>. [in Ukrainian].
24. Clóvis, L. R., Pinto, R. J. B., Uhdre, R. S., Rosa, J. C. et al. (2021). Overall heritability in popcorn estimated by meta-analysis. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 43. DOI: 10.4025/actasciagron.v43i1.53721.
25. Bhadru, D., Mallaiah, B., Swarnalatha, V., Sreelatha, D. et al. (2020). Study of genetic parameters for popping expansion ratio and yield traits in pop corn hybrids. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 2(4), 671–674. URL: <https://www.researchgate.net/profile/MallaiahBedika/publication/349393486>.
26. Litun P. P., Kyrychenko V. V., Petrenkova V. P., Kolomatska, V. P. (2009). Systemnyi analiz v selektsii kolovoykh kultur: navch. posib. Instytut roslynnytstva im. V. Ya. Yur'ieva. [Institute of Plant Breeding named after V. Ya. Yuriev]. Kharkiv, N. p. [in Ukrainian].

Купріченков Д.С. Комбінаційна здатність нових ліній розлусної кукурудзи (*Zea mays* L. *everta* Sturt.)

Ефективність селекційної роботи з розлусною кукурудзою (*Zea mays everta* Sturt.) залежить від елітних ліній, на базі яких створюються конкурентоспроможні гібридів із високими технологічними показниками зерна. Об'ємне розширення зерна – важливий технологічний показник зерна розлусної кукурудзи. Метою дослідження було виявлення ліній розлусної кукурудзи з високою комбінаційною здатністю за ознаками «врожайність» і «об'ємне розширення зерна» та встановлення характеру успадкування цих ознак. Вихідним матеріалом для проведення досліджень були лінії розлусної кукурудзи, створені в лабораторії селекції кукурудзи харчового

напряму використання ДУ Інститут зернових культур НААН України. Для визначення комбінаційної здатності 46 нових ліній розлусної кукурудзи були схрещені із 4 тестерами. Вивчення 170 трьохлінійних гібридів проходило на Синельниківській селекційно-дослідній станції протягом 2021–2022 рр. За результатами проведених досліджень було встановлено, що гібриди розлусної кукурудзи мали високі потенціали врожайності й об'ємного розширення зерна. Стабільно високі значення ефектів загальної комбінаційної здатності (ЗКЗ) за врожайністю зерна були виявлені в лініях РС 19, РК 72, РП 36, РР 6, РР 7, ІКР 11-3, ІКР 11-9 та ІКР 15-2. Найбільша кількість ліній із високою ЗКЗ була отримана із гібрида Snow Puff Popcorn F1, а з низькою ЗКЗ – із сорту Japanese Hulless White Popcorn. Стабільно високі значення ефектів ЗКЗ за об'ємним розширенням зерна продемонстрували лінії РС 3, РК 7, РК 72, РП 72, ІКР 8-2, ІКР 36-3, ІКР 75-1. Гібриди Creme Puff Corn F1 і Pick and Pop Popcorn F1 були найкращим вихідним матеріалом для отримання ліній із високою ЗКЗ за об'ємним розширенням зерна, а найгіршим – сорт Red River Valley Popcorn. Стабільно високі ефекти ЗКЗ за обома ознаками були лише в лінії РК 72, що робить її незамінною для селекції конкурентних гібридів розлусної кукурудзи із високими технологічними показниками зерна. За результатами проведених досліджень було встановлено, що коефіцієнт успадкованості H^2 (в широкому розумінні) за ознакою врожайності дорівнював 0,88 і 0,81, а за об'ємним розширенням зерна – 0,89 і 0,91, тоді, як коефіцієнт успадкованості h^2 (у вузькому розумінні) – 0,40 і 0,43 та 0,35 і 0,37, відповідно. Отже, спадкові чинники мають переважаючий вплив на фенотипову мінливість досліджуваних ознак, водночас об'ємне розширення зерна контролюється неадитивною дією генів, тоді, як на врожайність впливають адитивні й неадитивні генні чинники.

Ключові слова: розлусна кукурудза, лінія, комбінаційна здатність, врожайність, об'ємне розширення зерна, коефіцієнт успадкованості

Kuprichenkov D.S. Combining ability of new popcorn lines (*Zea mays L. everta* Sturt.)

The effectiveness of selection work with popcorn (*Zea mays everta* Sturt.) depends on elite lines on the basis

of which competitive hybrids with high technological indicators of grain are created. Popping expansion is an important technological indicator of popcorn grain. The aim of the study was to identify popcorn lines with high combining ability for the traits “yield” and “expansion” and establish heritability estimates of these traits. The starting material for conducting research was the popcorn lines created in the laboratory of corn selection for food use of the SE Institute of Grain Crops of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. To determine the combining ability, 46 new lines of popcorn were crossed with 4 testers. The study of 170 three-line hybrids took place at the Sinelnikovska, breeding and research station during 2021–2022. Based on the results of the conducted research, it was established that popcorn hybrids had high potential for yield and popping expansion. RS 19, RK 72, RP 36, RR 6, RR 7, IKR 11-3, IKR 11-9 and IKR 15-2 lines had stably high values of the effects of the total combining ability (GCA) by yield. The largest number of lines with a high GCA was obtained from the hybrid Snow Puff Popcorn F1, and with a low GCA was obtained from the Japanese Hulless White Popcorn variety. RS 3, RK 7, RK 72, RP 72, IKR 8-2, IKR 36-3, IKR 75-1 lines demonstrated stably high values of the effects of GCA by popping extension. The hybrids Creme Puff Corn F1 and Pick and Pop Popcorn F1 were the best source material for obtaining lines with a high GCA by popping expansion, while the Red River Valley Popcorn variety was the worst. Only the RK 72 line had consistently high effects of GCA on both traits, which makes it indispensable for the selection of competitive popcorn hybrids with high technological grain indicators. According to the results of the research, it was established that the heritability estimate H^2 (in the broad sense) for the yield trait was equal to 0.88 and 0.81, and for popping expansion – 0.89 and 0.91, while the heritability estimate h^2 (in the narrow sense) – 0.40 and 0.43 and 0.35 and 0.37, respectively. Therefore, hereditary factors have a predominant influence on the phenotypic variability of the investigated traits. It was established that the popping expansion of the grain is controlled by the non-additive effect of genes, at the same time, the yield is influenced by additive and non-additive genetic factors.

Key words: popcorn, line, combining ability, yield, popping expansion, heritability estimate.