

УДК 633.111.1:57.03

UDC 633.111.1:57.03

4.1.2. Селекция, семеноводство и биотехнология растений (биологические науки, сельскохозяйственные науки)

4.1.2. Breeding, Seed Production, and Biotechnology of Plants (Biological Sciences, Agricultural Sciences)

СПЕЦИФИЧЕСКАЯ КОМБИНАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ДИАЛЛЕЛЬНЫХ ГИБРИДОВ КУКУРУЗЫ И ЕЁ СВЯЗЬ С УСТОЙЧИВОСТЬЮ К ЗАСУХЕ В УСЛОВИЯХ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ

SPECIFIC COMBINING ABILITY OF DIALLEL CORN HYBRIDS AND ITS RELATIONSHIP WITH DROUGHT RESISTANCE IN THE CONDITIONS OF THE KRASNODAR REGION

Лемешева Анжелика Вячеславовна

Lemesheva Anzhelika Vyacheslavovna

Лаборант исследователь

Laboratory Researcher

SPIN-код: 7475-1526

RSCI SPIN – code: 7475-1526

Кубанский государственный аграрный университет, Россия, 350044, Краснодар, Калинина, 13

Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia, 350044, Kalinina, 13

Батурьян Маргарита Аветисовна

Baturyan Margarita Avetisovna

Канд. филологических наук

Candidate of Philological Sciences

SPIN-код: 8262-0135

RSCI SPIN – code: 8262-0135

Кубанский государственный аграрный университет, Россия, 350044, Краснодар, Калинина, 13

Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia, 350044, Kalinina, 13

В данной статье представлены результаты исследования специфической комбинационной способности (СКС) и индекса восприимчивости к засухе (DSI) у гибридов кукурузы, полученных методом диаллельных скрещиваний. Показано, как совокупность этих показателей влияет на формирование урожайности в различных погодных условиях (умеренных, благоприятных и засушливых), что имеет особую важность для селекционных программ в Краснодарском крае. Полученные данные подтверждают целесообразность комплексного подхода к отбору родительских линий, ориентированного на одновременное повышение продуктивности и устойчивости к дефициту влаги

This article presents the results of a study on the specific combining ability (SCA) and drought susceptibility index (DSI) in corn hybrids obtained through diallel crosses. It is shown how the combination of these indicators influences yield formation under various weather conditions (moderate, favorable, and drought), which is particularly important for breeding programs in the Krasnodar region. The obtained data confirm the feasibility of a comprehensive approach to selecting parental lines aimed at simultaneously increasing productivity and resistance to water deficit

Ключевые слова: КУКУРУЗА (ZEA MAYS L.), ДИАЛЛЕЛЬНЫЕ ГИБРИДЫ, КОМБИНАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ, АДДИТИВНОЕ И ДОМИНАНТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ГЕНОВ, УРОЖАЙНОСТЬ ЗЕРНА, ИНДЕКС ВОСПРИИМЧИВОСТИ К ЗАСУХЕ (DSI), УСТОЙЧИВОСТЬ К ЗАСУХЕ, СТАБИЛЬНОСТЬ, СЕЛЕКЦИЯ

Keywords: CORN (ZEA MAYS L.), DIALLEL HYBRIDS, COMBINING ABILITY, ADDITIVE AND DOMINANT GENE ACTION, GRAIN YIELD, DROUGHT SUSCEPTIBILITY INDEX (DSI), DROUGHT RESISTANCE, STABILITY, BREEDING

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-208-010>

Введение: Кукуруза (*Zea mays* L.) является одной из важнейших зерновых культур, обеспечивающих продовольственную безопасность и сырьё для промышленности. Тем не менее, её продуктивность

<http://ej.kubagro.ru/2025/04/pdf/10.pdf>

существенно снижается в условиях засушливого климата, что представляет собой серьёзную проблему для Краснодарского края. Это приводит к снижению урожайности на 20–50% в зависимости от уровня стресса, что требует разработки новых подходов к селекции устойчивых к засухе гибридов [2, 7,15].

Создание высокопродуктивных гибридов кукурузы, способных противостоять засушливым условиям, является одной из ключевых задач селекционной работы, проводимой Национальным центром зерна им. П.П. Лукьяненко. Ключевую роль в этом процессе играет оценка специфической комбинационной способности родительских линий. Методика диаллельных скрещиваний позволяет не только получить данные о потенциальной продуктивности гибридов, но и определить взаимодействие генов, отвечающих за устойчивость к стрессу [6, 12].

Настоящее исследование направлено на изучение продуктивности и устойчивости инбредных линий и их гибридов в условиях нормального, благоприятного и засушливого стресса в различных климатических зонах Краснодарского края. Особое внимание уделено анализу индекса восприимчивости к засухе (DSI) и взаимодействию генотип-среда (GEI) [3, 4, 5].

Материалы и методы:

Растительный материал: для эксперимента были отобраны пять инбредных линий кукурузы: А32, А16, А19, А42 и А27. Эти линии характеризуются высокой адаптивностью к агроклиматическим условиям Краснодарского края и представляют интерес с точки зрения создания высокопродуктивных гибридов.

Схема эксперимента: Скрещивания проводились по полной диаллельной схеме, что позволило получить 20 гибридов F1. Экспериментальные посевы были заложены в трёх различных по условиям годам (Таблица 1).

2022 год (умеренные условия): Умеренная влажность с периодическими осадками.

2023 год (благоприятные условия): Оптимальные климатические параметры с равномерным распределением осадков.

2024 год (засушливые условия): Минимальное количество осадков и высокие температуры.

Таблица 1. Погодные условия за годы исследований:

Год	Условия	Осадки в период вегетации (мм)	Температура в период вегетации (°C)
2022	Умеренные	208	18–30
2023	Благоприятные	269	17–28
2024	Засушливые	135	19–35

Эксперимент был организован в виде рандомизированного полного блочного дизайна (RCBD) с тремя повторностями. Размер делянки составлял 9,8 м², а междурядья были установлены на уровне 70 см. Для проведения полевых испытаний применялись современные сеялки и комбайны, что обеспечивало высокую точность эксперимента [1].

Методы оценки:

Индекс восприимчивости к засухе (DSI): Индекс восприимчивости к засухе (DSI) позволяет оценить, насколько устойчив к засухе конкретный генотип в сравнении с другими [13, 14]. Он рассчитывается по формуле, предложенной Фишером и Маурером (1978):

$$DSI = \frac{(1 - Y_p/Y)}{(1 - X_p/X)}$$

Обозначения:

- DSI — индекс восприимчивости к засухе;
- Y_p — урожайность генотипа в условиях засухи;

- Y — урожайность генотипа в нормальных условиях;
- X_p — средняя урожайность всех генотипов в условиях засухи;
- X — средняя урожайность всех генотипов в нормальных условиях.

Интерпретация:

- $DSI < 1$: Генотип устойчив к засухе.
- $DSI = 1$: Средняя восприимчивость к засухе.
- $DSI > 1$: Генотип чувствителен к засухе.

Комбинационная способность (SCA):

Специфическая комбинационная способность (SCA) позволяет определить, как конкретный гибрид проявляет продуктивность в сравнении с ожидаемыми значениями, основанными на средней продуктивности родительских линий [7, 9, 10].

Модель Гриффинга (Griffing, 1956):

Анализ проводится на основе метода, который учитывает два основных компонента дисперсии:

Аддитивные эффекты генов (GCA) — вклад каждого родителя.

Доминантные эффекты генов (SCA) — специфическое взаимодействие генов.

Формула для оценки SCA:

$$SCA_{ij} = Y_{ij} - (\mu + GCA_i + GCA_j)$$

Обозначения:

SCA_{ij} - специфическая комбинационная способность для гибрида

Y_{ij} - фактическая урожайность гибрида

μ - общая средняя урожайность всех гибридов;

GCA_i и GCA_j - эффекты общей комбинационной способности родительских линий

Дисперсионный анализ:

Для оценки SCA используется дисперсионный анализ (ANOVA), где факторы разбиваются на вклад GCA, SCA и остаточной дисперсии (ошибки) [8, 11, 16].

Результаты исследования

Для оценки продуктивности и адаптивного потенциала исходных инбредных линий кукурузы в разные по погодным условиям годы была составлена (Таблица 2), где отражена урожайность пяти линий (A32, A16, A19, A42 и A27) в 2022, 2023 и 2024 годах.

Таблица 2. Средняя урожайность (т/га) изучаемых линий в различных условиях:

Линия	2022 Урожайность (т/га)	2023 Урожайность (т/га)	2024 Урожайность (т/га)	Средняя Урожайность (т/га)
A32	1,50	2,47	1,29	1,75
A16	1,68	1,91	0,82	1,47
A19	1,25	2,41	1,18	1,61
A42	1,77	1,81	1,48	1,69
A27	1,87	1,95	0,85	1,55

Данные показывают, что при благоприятных условиях (2023 год) лучшим результатом среди изученных образцов отметилась линия A32 (2,47 т/га), тогда как в засушливом 2024 году наиболее стабильную урожайность (1,48 т/га) продемонстрировала линия A42. Средние показатели за три сезона подтверждают высокий потенциал линий A32 (1,75 т/га) и A42 (1,69 т/га) по сравнению с остальными; причём A42 сохраняла относительно высокий уровень продуктивности даже в стрессовых условиях. Следовательно, исходя из информации, можно заключить, что в условиях ограниченной влаги линия A42 заслуживает особого внимания как родительская форма, а в благоприятные годы перспективнее проявляет себя A32.

Для сравнения продуктивности лучших гибридных комбинаций с применяемым в регионе стандартом «Жемчуг Кубани» рассмотрим таблицу 3

Таблица 3. Средняя урожайность (т/га) лучших экспериментальных гибридов в различных условиях:

Гибрид	2022 Урожайность (т/га)	2023 Урожайность (т/га)	2024 Урожайность (т/га)	Средняя Урожайность (т/га)	Разница от Стандарта Средняя
Жемчуг Кубани (St)	6,00	6,80	3,50	5,43	—
A42 × A19	6,38	7,45	4,44	6,09	0,66
A27 × A19	6,90	7,68	3,67	6,08	0,65
A42 × A27	6,73	7,57	3,85	6,05	0,62
A42 × A16	6,74	7,43	3,93	6,03	0,60
A27 × A16	6,30	7,51	4,29	6,03	0,60
A32 × A42	6,46	6,94	4,66	6,02	0,59
A19 × A42	6,57	7,21	4,12	5,97	0,54
НСР _{0,05}	0,40	0,50	0,30	0,40	—

Из неё видно, что все перечисленные экспериментальные гибриды превзошли стандарт по средней урожайности, при этом наибольшая разница (+0,66 т/га) отмечена у гибрида A42 × A19, суммарно дающего 6,09 т/га за три года. Благоприятные условия 2023 года оказались особенно продуктивными для гибридов A27 × A19 и A42 × A27, однако в засушливом сезоне (2024 год) наиболее результативным стал A32 × A42 (4,66 т/га). Эти факты свидетельствуют о том, что линии A42 и A19 способны обеспечивать высокий потенциал урожайности в широком диапазоне условий, а A32 × A42 выделяется именно в условиях дефицита влаги.

Для определения степени вклада генотипических факторов и условия года, а также их совместного влияния на признак «урожайность», был проведён дисперсионный анализ с результатами, сведёнными в таблице 4.

Таблица 4. Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) факторов «гибрид», «год» и их взаимодействия по признаку «урожайность».

Источник вариации	Сумма квадратов	Степени свободы	F-критерий	p-значение
С(Гибрид)	10,37	20,00	13,63	0,00
С(Год)	358,20	2,00	4709,44	0,00
С(Гибрид):С(Год)	14,61	40,00	9,60	0,00
Остаточная дисперсия	4,79	126,00	—	—

Значения F-критерия и соответствующие p-значения убедительно показывают, что факторы «гибрид» и «год», равно как и их взаимодействие, вносят существенный вклад в вариацию признака ($p=0,00$ во всех случаях). На практике это означает, что и генотипические различия, и климатические условия каждого отдельного года в равной мере определяют эффективность проявления продуктивности; кроме того, разные гибриды по-разному реагируют на одинаковые стрессовые факторы. Таким образом, опыты необходимо повторять в нескольких контрастных по погоде сезонах, чтобы выявить формы, обладающие универсальной адаптивностью [1].

Для детального анализа комбинационных способностей инбредных линий и определения устойчивости гибридов к дефициту влаги составлена (таблица 5), где представлены значения специфической комбинационной способности (СКС) и индекса восприимчивости к засухе (DSI).

Таблица 5. Показатели СКС и DSI экспериментальных гибридов от диаллельные скрещиваний

Гибрид	СКС	DSI
A42 × A19	0,35	0,57
A27 × A19	0,18	0,68
A42 × A27	0,23	0,64
A42 × A16	0,21	0,63
A27 × A16	0,23	0,61
A32 × A42	-0,06	0,56
A19 × A42	0,19	0,69
A16 × A32	0,02	0,71
A27 × A42	0,02	0,74
A19 × A16	0,10	0,74
A19 × A32	-0,03	0,78
A16 × A42	0,12	0,67
A32 × A19	-0,07	0,94
A32 × A16	-0,40	0,82
A32 × A27	-0,19	0,85
A42 × A32	-0,22	0,82
A19 × A27	-0,38	0,89
A27 × A32	-0,41	0,88
A16 × A19	-0,51	0,83
A16 × A27	-0,46	0,83

Наиболее высокие положительные эффекты СКС (до +0,35) отмечены в гибриде A42 × A19, что коррелирует с его лидирующими показателями урожайности. В то же время некоторые комбинации (например, A16 × A19, A32 × A16, A19 × A27) продемонстрировали отрицательные эффекты СКС, свидетельствующие о слабой синергии родительских генотипов. Показатели DSI показывают степень устойчивости к засухе: низкое значение индекса (менее 0,60) говорит о хорошей адаптации. Самым благоприятным оказался гибрид A32 × A42 (DSI=0,56), за ним следует A42 × A19 (DSI=0,57), который при этом сочетает низкую восприимчивость к стрессу с самой высокой СКС. Таким образом, анализ (таблица 5) указывает на исключительную ценность родительской линии A42 и её сочетания с A19 и A32 для селекции высокопродуктивных и стрессоустойчивых гибридов.

Заключение:

Проведённое исследование подтвердило высокую значимость оценки специфической комбинационной способности (СКС) и индекса восприимчивости к засухе (DSI) при создании новых гибридов кукурузы, способных сохранять высокую урожайность в условиях стрессовых факторов Краснодарского края. Наиболее перспективным по совокупности признаков (урожайность, толерантность к дефициту влаги) оказался гибрид A42 × A19, демонстрирующий положительные эффекты СКС и один из самых низких показателей DSI. Кроме того, генотип A32 × A42 выделился как форма с наилучшей засухоустойчивостью, несмотря на отрицательные значения СКС, что может указывать на роль других генетических механизмов, способствующих адаптивности в условиях ограниченной влаги. Таким образом, результаты работы позволяют рекомендовать линии A42 и A19 в качестве приоритетных родительских форм для селекционных программ, направленных на повышение продуктивности и устойчивости гибридов кукурузы к засушливому климату.

Список используемой литературы

1. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов). – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.\
2. Abdulla S.M.S., Abdulkhaliq D.A., Towfiq S.I. Partial diallel analysis of maize inbred lines for kernel yield and its components in Sulaimani-Iraq // *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*. – 2022. – Vol. 53 (5). – P. 1190–1202. – <https://doi.org/10.36103/ijas.v53i5.1633>.
3. Alam M.A., Rahman M., Ahmed S., Jahan N., Khan M.A.A., Islam M.R., Alsuhaibani A.M., Gaber A., Hossain A. Genetic variation and genotype by environment interaction for agronomic traits in maize (*Zea mays* L.) hybrids // *Plants*. – 2022. – Vol. 11 (11). – P. 1–16. – <https://doi.org/10.3390/plants11111522>.
4. Daemo B.B., Yohannes D.B., Beyene T.M., Abteu W.G. AMMI and GGE biplot analyses for mega environment identification and selection of some high-yielding cassava genotypes for multiple environments // *International Journal of Agronomy*. – 2023. – P. 1–13.
5. Eze C.E., Akinwale R.O., Michel S., Bürstmayr H. Grain yield and stability of tropical maize hybrids developed from elite cultivars in contrasting environments under a rainforest agro-ecology // *Euphytica*. – 2020. – Vol. 216 (6). – P. 1–13. – <https://doi.org/10.1007/s10681-020-02620-y>.

6. Fischer R.A., Maurer R. Drought resistance in spring wheat cultivar: I. Grain yield response // Australian Journal of Agricultural Research. – 1978. – Vol. 29. – P. 897–912.
7. Griffing B. Concepts of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems // Australian Journal of Biological Sciences. – 1956. – Vol. 9. – P. 463–493.
8. Li Z., Coffey L., Garfin J., Miller N.D., White M.R., Spalding E.P., De Leon N., Kaeppler S.M., Schnable P.S., Springer N.M., Hirsch C.N. Genotype-by-environment interactions affecting heterosis in maize // PLoS ONE. – 2018. – Vol. 13 (1). – P. 1–16. – <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191321>.
9. Murtadha M.A., Ariyo O.J., Alghamdi S.S. Analysis of combining ability over environments in diallel crosses of maize (*Zea mays* L.) // Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. – 2018. – Vol. 17 (1). – P. 69–78. – <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.01.004>.
10. Nasser L.M., Badu-Apraku B., Gracen V.E., Mafouasson H.B. Combining ability of early-maturing yellow maize inbreds under combined drought and heat stress and well-watered environments // Agronomy. – 2020. – Vol. 10 (10). – P. 1–26. – <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.08.PNE1108>.
11. Rani N., Nirala R.B.P., Pal A.K., Ranjan T. Combining ability for quantitative traits under normal and heat stress conditions in maize (*Zea mays* L.) // Bangladesh Journal of Botany. – 2021. – Vol. 50 (3). – P. 659–669. <https://doi.org/10.3329/bjb.v50i3.55846>.
12. Sah R.P., Chakraborty M., Prasad K., Pandit M., Tudu V.K., Chakravarty M.K., Narayan S.C., Rana M., Moharana D. Impact of water deficit stress in maize: Phenology and yield components // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10 (1). – P. 1–15.
13. Sewore B.M., Abe A., Nigussie M. Evaluation of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for drought tolerance using morpho-physiological traits under drought-stressed and well-watered conditions // PLoS ONE. – 2023. – Vol. 18 (5). – P. 1–32. – <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283347>.
14. Weber V.S., Melchinger A.E., Magorokosho C., Makumbi D., Bänziger M., Atlin G.N. Efficiency of managed-stress screening of elite maize hybrids under drought and low nitrogen for yield under rainfed conditions in Southern Africa // Crop Science. – 2012. – Vol. 52 (3). – P. 1011–1020. – <https://doi.org/10.2135/cropsci2011.09.0486>.
15. Yadesa L.M., Alamerew S., Tadesse B. Combining ability study for grain yield and agronomic traits of quality protein maize (*Zea mays* L.) inbred lines adapted to mid-altitude agroecology of Ethiopia // Agro Bali: Agricultural Journal. – 2021. – Vol. 4 (3). – P. 286–304. – <https://doi.org/10.37637/ab.v4i3.733>.
16. Yan W., Kang M.S., Ma B., Woods S., Cornelius P.L. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data // Crop Science. – 2007. – Vol. 47 (2). – P. 643–655. – <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.06.0374>.