

ПРИМЕНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В СЕЛЕКЦИИ МЕЛКОСЕМЕННОЙ ЧЕЧЕВИЦЫ НА ПРИГОДНОСТЬ К МЕХАНИЗИРОВАННОЙ УБОРКЕ

Т. В. Маракаева, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры агрономии, селекции и семеноводства, tv.marakaeva@omgau.org, ORCID ID: 0000-0001-9384-8112

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина», 644008, г. Омск, ул. Институтская площадь, д. 1

Отсутствие местных сортов, а также низкая конкурентоспособность и недостаточная технологичность возделываемых в регионе сортов чечевицы различной географической селекции обуславливают потребность в более быстром улучшении культуры по параметрам пригодности к механизированной уборке. Использование маркеров позволяет существенно сократить время, необходимое для выведения сортов с наличием желаемых показателей. Исследование направлено на поиск KASP-маркеров, сопряженных с признаками технологичности, в коллекционных образцах, а также на выявление эффективных SNP-локусов для применения в маркер-ориентированной селекции чечевицы в Западной Сибири. Установлено, что благоприятными для роста и развития оказались очень засушливые условия 2023 г., когда отмечен более компактный куст у растения чечевицы, связанный со слабой степенью ветвистости (1–4 ветви первого и последующего порядка), степенью облиственности менее 60 % и среднесуточным приростом менее 0,70 см в сутки и меньшим растрескиванием бобов (10,93 %). Генотипирование выявило статистически значимое влияние ветвистости и облиственности (LcRBContig00050 и LcRBContig00065) на увеличение устойчивости к полеганию агрофитоценоза чечевицы, выраженное в уменьшении вегетативной массы растения на 10 – 30 %. Благоприятный аллель маркеров скорости роста (LcRBContig00079 и LcRBContig00158) статистически достоверно увеличивает среднесуточный прирост растения на 0,35–0,91 см на начальных этапах развития. В увеличении высоты растения на 2–8 см и высоты прикрепления нижних бобов на 1–4 см значительный вклад внесли KASP-маркеры LcRBContig01123 и LcRBContig0534. Ассоциированный с нерастрескиваемостью бобов SNP (LcRBContig00067) позволяет увеличить процент нерастрескивающихся бобов в период созревания чечевицы до 90 %. В итоге отобраны образцы мелкосеменной чечевицы с набором генов, отвечающих за пригодность к механизированной уборке, достоверно превосходящие стандарт по технологичности: Орловская краснотерная, Северная, Рубиновая (Россия), Крапинка (Казахстан), Pardina Linsen (Германия), КДЦ Кермит, Redcap (Канада).

Ключевые слова: чечевица; *Lens culinaris*; KASP-маркеры; признаки пригодности к механизированной уборке; генотип.

Для цитирования: Маракаева, Т. В. Применение молекулярно-генетических методов в селекции мелкосеменной чечевицы на пригодность к механизированной уборке // Зерновое хозяйство России. 2025. Т. 17, № 5. С. 34–41. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-100-5-34-41.



APPLICATION OF MOLECULAR GENETIC METHODS IN BREEDING OF SMALL-SEEDED LENTILS FOR SUITABILITY FOR MECHANICAL HARVESTING

T. V. Marakaeva, Candidate of Agricultural Sciences, docent, associate professor of the department of agronomy, breeding and seed production, tv.marakaeva@omgau.org, ORCID ID: 0000-0001-9384-8112

FSBEI HE "Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin" (FSBEI HE Omsk SAU), 644008, Omsk region, Omsk, Institutskaya Sq. 1

The lack of local varieties, as well as low competitiveness and insufficient technological efficiency of lentil varieties of various geographical breeding, determine the necessity for faster improvement of the crop in terms of suitability for mechanized harvesting. The use of markers allows reducing significantly the time required for breeding varieties with the desired indicators. The current study was aimed at searching for KASP markers associated with technological traits in collection samples, as well as identifying effective SNP loci for use in marker-assisted breeding of lentil in Western Siberia. There has been found that aridity in 2023 was favorable for growth and development, since there has been established a more compact bush of the lentil plant due to a weak degree of branching (1–4 branches of the first and subsequent order), a foliage degree of less than 60 % and a mean daily growth of less than 0.70 cm per day and less cracking of beans (10.93 %). Genotyping has demonstrated a statistically significant effect of branching and foliage (LcRBContig00050 and LcRBContig00065) on increasing the lodging resistance of lentil agrophytocenosis, expressed in a vegetative mass decrease by 10–30 %. The favorable allele of the growth rate markers (LcRBContig00079 and LcRBContig00158) has statistically significantly increased the average daily plant growth by 0.35–0.91 cm at the initial stages of development. The KASP markers LcRBContig01123 and LcRBContig0534 have made a significant contribution to increasing the plant height by 2–8 cm and the height of the lower beans' attachment by 1–4 cm. The SNP (LcRBContig00067) associated with the non-cracking of beans allows increasing the percentage of non-cracking lentil beans during maturation to 90%. As a result, there have been selected the small-seeded lentil samples with a set of genes responsible for suitability for mechanized harvesting, reliably

surpassing the standard in terms of technological effectiveness, such as 'Orlovskaya Krasnozernaya', 'Severnaya', 'Rubinovaya' (Russia), 'Krapinka' (Kazakhstan), 'Pardina Linsen' (Germany), 'KDC Kermit', 'Redcap' (Canada).

Keywords: lentil; *Lens culinaris*; KASP markers; traits of suitability for mechanical harvesting; genotype.

Введение. В Российской Федерации Омская область признается весьма перспективной для возделывания чечевицы, входя в пятерку основных производителей зерна этой культуры (помимо вышеуказанного региона, сюда также входят Алтайский край, Саратовская, Оренбургская и Рязанская области) с площадями посева, превышающими 25 тыс. га и среднегодовым производством 28,3 тыс. т (Быкова, 2023).

Несмотря на значительные площади посевов, регион существенно уступает другим областям по уровню урожайности (Быкова, 2023). Основными причинами являются отсутствие местных сортов, а также низкая конкурентоспособность и недостаточная технологичность возделываемых сортов чечевицы различной географической селекции, которые к тому же слабо адаптированы к резко изменяющимся условиям сибирского агроэкологического климата (Маракаева, 2024).

Таким образом, становится актуальной задача создания сортов чечевицы, адаптированных к условиям Сибири, которые уже на этапе ветвления демонстрировали бы высокую технологичность без снижения итоговой урожайности. Применение современных методов молекулярной биологии в этом направлении весьма целесообразно.

Исследование генома чечевицы продвигалось значительно медленнее по сравнению с такими зерновыми бобовыми культурами, как соя, фасоль и горох. Это обусловлено рядом факторов, включая ограниченную производственную базу из-за климатических условий, сложность адаптации растения, невысокие инвестиции в исследования секвенирования из-за стоимости технологий, а также сравнительно большой размер генома (~4 Гбн). По этим причинам маркер-ассоциированный отбор (MAS) в селекции чечевицы использовался очень ограниченно (Chen et al., 2024).

Австралийская исследовательская группа провела секвенирование транскриптома чечевицы с использованием платформы Roche 454 GS-FLX Titanium (Roche Diagnostics Corporation). В ходе работы было выявлено 2392 простых повторяющихся последовательности (SSR), содержащих экспрессированные метки последовательностей (EST) (Wang et al., 2020). На основе этого исследования те же ученые позже идентифицировали многочисленные однонуклеотидные полиморфизмы (SNP) и использовали 546 SSR и 768 SNP-маркеры для построения генетической карты чечевицы (Wang et al., 2020).

Команда во главе с A. G. Sharpe разработала анализы KASP на основе 28 SNP и массив GoldenGate™ (Illumina, Inc.) с 1536 SNP для генетического картирования чечевицы (Sharpe, 2013). В свою очередь U. Majeed и колле-

ги описали основные требования к KASP-анализам для данного растения (Majeed et al., 2018). На основе их исследований команда под руководством M. J. Fedoruk внедрила 56 KASP-маркеров для генетического картирования и количественной оценки локусов признаков (QTL), связанных с морфологическими характеристиками растений чечевицы, включающих признаки пригодности к механизированной уборке (Fedoruk et al., 2013).

Позже Rodda M.S. с соавторами объединили анализ GoldenGate на основе 768 новых SNP с анализами KASP, включающими 200 ранее опубликованных SNP, а также маркеры SSR. Такое комбинированное генотипирование рекомбинантной инбредной линии (RIL) использовалось для составления карты сцеплений и выполнения QTL анализа комплекса морфофизиологических показателей, содержащего некоторые признаки технологичности (Rodda et al., 2018).

Использование современных инструментов молекулярной биологии в селекции чечевицы позволяет идентифицировать не только целевые гены технологичности, но и их аллельное состояние на любом этапе селекционного процесса (Дубина и Олимова, 2025). Это дает возможность классифицировать все изученные образцы на пригодные и непригодные для механизированной уборки. Совместная оценка фенотипического и генотипического разнообразия значительно сокращает объем селекционной работы и обеспечивает точечный отбор генотипов с нужными генами, а интеграция ДНК-маркеров в селекционные программы существенно ускоряет достижение запланированных результатов.

Повышение технологичности отечественных сортов чечевицы позволит проводить профессиональную механизированную уборку и сохранить при этом высокий уровень урожайности зерна.

В связи с этим мы провели идентификацию генов пригодности к механизированной уборке, на основе которой дифференцировали изученные генотипы мелкосеменной чечевицы на генетическом уровне.

Цель исследований – выявить степень воздействия локусов SNP, сцепленных с признаками пригодности к механизированной уборке, у коллекционных образцов мелкосеменной чечевицы разного географического происхождения и отобрать ценные генотипы для дальнейшей селекции культуры в регионе.

Материалы и методы исследований.

Коллекция сортообразцов мелкосеменной чечевицы оценивалась в течение трех вегетационных сезонов (2022–2024 гг.) на территории учебно-опытного хозяйства ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина» (ФГБОУ ВО Омский ГАУ,

Омская обл.). Исследовали 96 образцов чечевицы, отличающихся происхождением (Россия, Канада, Турция, Греция, Германия, Болгария, Молдова).

Как стандарт был взят среднеранний сорт Пикантная (оригинатор – ФГБНУ «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы» (ФГБНУ РосНИИСК «Россорго», г. Саратов)). Посев сортообразцов коллекционного питомника провели во второй декаде мая на делянках с учетной площадью 1 м² с площадью питания каждого растения 0,025 м². Повторность в опыте четырехкратная. Предшественник – яровая мягкая пшеница. Опытные делянки располагали систематически. Опытный участок расположен на лугово-черноземной среднесуглинистой почве. По результатам агрохимического анализа она характеризуется следующими показателями: содержание гумуса (по Тюрину) составляет 3,95 %, подвижного фосфора и калия (по Кирсанову) – соответственно 154 и 236 мг/кг, кислотность почвы близка к нейтральной (рН_{сол.} 6,5), сумма обменных катионов Ca²⁺ и Mg²⁺ (по ГОСТ 26423-85) – соответственно 15,8 и 5,7 ммоль/100 г. При наступлении фазы созревания (на 2/3 куста отмечались созревшие бобы) уборку урожая провели вручную.

Данные по гидротермическим условиям в годы проведения исследований получены с сайта https://rp5.ru/Погода_в_Омске. В последние годы для Омской области характерны значительные колебания климатических условий. Из-за неравномерности выпадения осадков в большинстве муниципальных районов региона все чаще стали отмечаться засухи и засушливая погода в период посевной кампании, а в уборку – переувлажнение. Агроarii южной зоны области почти каждое лето сталкиваются с почвенной засухой. Зимы становятся мягче, весна наступает раньше, зимний период переносится на более поздний срок, а вегетационный период увеличивается. Зафиксированные погодные условия в исследуемые годы являются тому подтверждением. За вегетационный период чечевицы установлено превышение суммы активных температур ($t \geq 10^\circ\text{C}$) над среднемноголетней нормой (2173 °C) на 315 °C в 2022 г., в 2023 г. – на 310 °C, в 2024 г. – на 275 °C. По объему осадков также отмечено превышение над нормой на 30,72 % в 2022 г. (287,6 мм), на 3,2 % – в 2024 г., а в 2023 г. наблюдался недобор осадков на 8,5 % в сравнении со среднемноголетним значением (187,2 мм). В конечном итоге в 2022 и 2024 гг. сформировались слабо засушливые условия (ГТК = 1,02 и ГТК = 1,21 соответственно) и очень засушливые в 2023 г. (ГТК = 0,75) (Маракаева, 2024).

Лабораторные и полевые исследования коллекционных образцов чечевицы проводили по методическим указаниям по изучению зернобобовых культур Всероссийского НИИ

растениеводства им. Н. И. Вавилова (Корсаков и др., 1975).

Для проведения генотипирования 96 образцов мелкосеменной чечевицы провели отбор свежих листьев растений на 30-е сутки после посева. Генотипирование проводили с помощью технологии KASP по девяти маркерам, сопряженным с признаками пригодности к механизированной уборке, которые ранее были преобразованы из локусов SNP, выявленных в результате GWAS-анализа, в маркеры KASP. Геномную ДНК выделяли из молодых листьев при 3-кратной репликации с использованием протокола с модификациями, описанного Delaporta et al. (1983). Очистку выделенной ДНК проводили с использованием коммерческих наборов (Qiagen, Германия). Концентрацию и качество геномной ДНК измеряли спектрофотометрией (BioRad, США). Состав выделенной ДНК определяли по оптической плотности OD₂₆₀/OD₂₈₀. Концентрацию ДНК для каждого образца доводили до 50 нг/мкл. Праймеры, используемые в ПЦР, синтезированы компанией ООО «Биолабмикс» (Россия). ПЦР-продукты разделяли на 2%-м агарозном геле, окрашивали бромидом этидия, визуализацию проводили с помощью системы документирования геля Gel Doc XR+ («Bio-Rad», США).

Статистическую обработку данных, полученных в настоящем исследовании, проводили с помощью двухфакторного дисперсионного анализа в программе SPSS (PASW) Statistics 20.0 («IBM», США). Достоверность различий оценивали по наименьшей существенной разности при уровне значимости 5 (HCP₀₅), определяли средние значения показателей (M) и стандартные ошибки средних ($\pm$ SEM). Значимость различий между усредненными значениями групп образцов оценивали с помощью t-критерия Стьюдента в Microsoft R Open 3.3.3. Разделение проводили на три группы: AA – доминантное, aa – рецессивное, Aa – гетерозиготное. Используя t-test, с помощью критерия Стьюдента устанавливали достоверность и суммарный эффект наличия SNP в различном аллельном состоянии. С помощью Welch Two Sample t-test в программе R-statistics выполняли t-test и получали значения критерия Стьюдента и различия по группам.

Наследуемость в широком смысле (H^2) рассчитывали по следующей формуле:

$$H^2 = \frac{V_g}{V_T}, \quad (1)$$

где V_g – суммы дисперсии, связанной с различиями в генотипе; V_T – общая дисперсия.

Результаты и их обсуждение. При фенотипической оценке образцов мелкосеменной чечевицы наблюдалась вариативность показателей пригодности к механизированной уборке в течение трех вегетационных периодов изучения (табл. 1). Высота находилась в пределах 35,44–39,52 см, а высота расположения нижних бобов изменялась от 18,50 до 21,36 см.

Таблица 1. Характеристика образцов коллекции мелкосеменной чечевицы по показателям, связанным с пригодностью к механизированной уборке (среднее за 2022–2024 гг.)
Table 1. Characteristics of the small-seeded lentil samples according to indicators of suitability for mechanical harvesting (mean in 2022–2024)

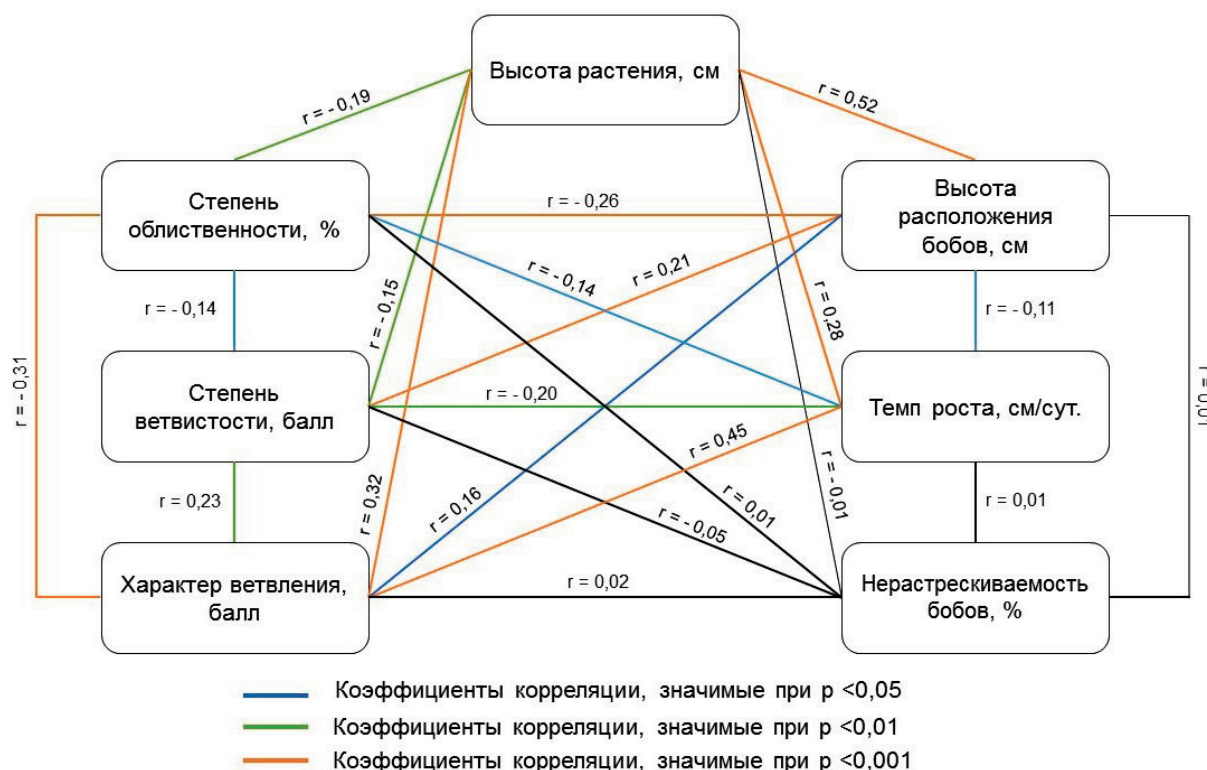
Показатель	2022 г.		2023 г.		2024 г.	
	значение	H ²	значение	H ²	значение	H ²
Высота растения, см	39,35±0,78	0,95	35,44±0,77	0,97	39,52±1,15	0,93
Высота расположения бобов, см	18,50±0,47	0,95	21,36±0,63	0,97	18,83±0,55	0,93
Степень ветвистости, балл	5,01±0,08	0,95	4,31±0,03	0,98	5,19±0,10	0,92
Степень облиственности, %	60,40±1,79	0,92	59,19±1,76	0,98	60,75±1,81	0,93
Темп роста, см/сут.	0,70±0,02	0,97	0,69±0,02	0,97	0,72±0,04	0,93
Характер ветвления, балл	3,36±0,16	0,96	3,31±0,15	0,97	3,38±0,17	0,96
Нерастрескиваемость бобов, %	82,59±1,61	0,96	89,07±1,71	0,98	83,70±1,67	0,92

Благоприятными для роста и развития оказались очень засушливые условия 2023 г., когда отмечен более компактный куст у растения чечевицы, связанный со слабой степенью ветвистости (1–4 ветви первого и последующего порядков), степенью облиственности менее 60 % и среднесуточным приростом менее 0,70 см в сутки. Также в 2023 г. наблюдалось меньшее растрескивание бобов (10,93 %) – на 6–7 % по сравнению с остальными годами представленных исследований.

Хотя коллекция мелкосеменной чечевицы отличается разнообразием по географическому происхождению образцов, все проанализи-

рованные характеристики демонстрировали широкую наследуемость, превышающую 0,90.

В результате изучения взаимосвязей признаков пригодности к механизированной уборке у образцов мелкосеменной чечевицы отмечена высокая корреляция высоты расположения нижних бобов с высотой растения ($r = 0,52$), но слабая со степенью ветвистости ($r = 0,21$) и характером ветвления ($r = 0,16$), что свидетельствует о существенном снижении технологичности сортообразцов из разных экологических групп, неадаптированных к условиям Западной Сибири (см. рисунок).



Коэффициенты корреляции (r) между показателями пригодности к механизированной уборке у коллекционных образцов мелкосеменной чечевицы в период 2022–2024 годов
Correlation coefficients (r) between indicators of suitability for mechanical harvesting in the small-seeded lentil samples in 2022–2024

Отрицательные значения коэффициентов корреляции высоты расположения нижних бобов и степени облиственности ($r = -0,26$) можно рассматривать как снижение технологичности

за счет увеличения индекса листовой поверхности. Характер ветвления оказал положительное влияние на степень ветвистости ($r = 0,23$). Это связано с тем, что при ветвлении растений

чечевицы преимущественно в нижней части образуется больше ветвей первого и последующего порядков.

Отрицательная корреляция степени ветвистости с темпом роста ($r = -0,20$) и высотой растения ($r = -0,16$) указывает на то, что при увеличении числа ветвей увеличивается его вегетативная масса, а не высота. А вот характер ветвления по всему стеблю растения

положительно влияет на его среднесуточный прирост ($r = 0,45$).

Фенологическая оценка сортообразцов чечевицы в полевых и лабораторных условиях позволила определить вклад определенных генов в фенотипическое проявление признаков пригодности к механизированной уборке (табл. 2).

Таблица 2. Вклад KASP-маркеров в фенотипическое проявление признаков пригодности к механизированной уборке, 2022–2024 годы

Table 2. Contribution of KASP markers to the phenotypic expression of suitability for mechanical harvesting (2022–2024)

KASP ID	Благоприятный аллель**	Год	Критерий Стьюдента (p)	R ² , %	SNP-эффект*
Степень облиственности (%)					
LcRBContig00050	A/G	2022	0,014	8,21	-13,7
		2023	0,10	5,13	-10,7
		2024	0,017	10,82	-14,5
Степень ветвистости, балл					
LcRBContig00065	A/G	2022	0,011	5,81	-0,41
		2023	0,82	1,11	-0,01
		2024	0,031	8,93	-0,52
Темп роста (см/сут.)					
LcRBContig00079	A/G	2022	0,038	5,46	0,54
		2023	0,021	6,62	0,41
		2024	0,051	7,81	2,55
LcRBContig00158	A/M	2022	0,015	5,11	0,61
		2023	0,018	7,31	0,46
		2024	0,028	4,82	0,71
Высота расположения бобов (см)					
LcRBContig00534	A/G	2022	0,05	5,22	1,72
		2023	0,10	2,85	0,30
		2024	0,011	6,44	3,48
Характер ветвления (балл)					
LcRBContig00133	A/G	2022	0,015	4,82	1,58
		2023	0,025	5,73	1,18
		2024	0,016	6,81	1,74
LcRBContig00805	A/G	2022	0,034	8,49	0,42
		2023	0,027	5,83	0,29
		2024	0,021	6,53	1,65
Высота растения (см)					
LcRBContig01123	A/G	2022	0,68	2,34	1,77
		2023	0,093	4,91	6,70
		2024	0,018	7,74	7,95
Нерастрескиваемость бобов (%)					
LcRBContig00067	A/G	2022	0,018	8,31	4,16
		2023	0,03	6,45	3,31
		2024	0,001	10,91	4,78

Примечание. * – в таблице указаны SNP, имеющие достоверный эффект в течении двух и более лет при значении критерия Стьюдента до 0,05, а значения R² – до 5 %. ** – в таблице указаны сокращения: А-аденин, G-гуанин, М-гетерозиготное состояние в двух вариантах – А-аденин, С-цитозин. Благоприятный аллель выделен жирным шрифтом.

Статистическая обработка полученных результатов выявила, что все гены, идентифицированные с помощью технологии KASP, внесли определенный вклад в пригодность растений чечевицы к механизированной уборке в течение всего периода изучения. Для признака степень облиственности растения выявлен один SNP (LcRBContig00050) с фенотипиче-

ской дисперсией облиственности по маркеру LcRBContig00050 от 5,21 до 6,83 %.

Наличие благоприятных аллелей LcRBContig00050 и LcRBContig00065 уменьшает вегетативную массу растения на 10–30 % за счет снижения степени ветвистости и облиственности, тем самым увеличивая устойчивость к полеганию агрофитоценоза чечевицы в пределах

15–20 %. Для признака «темп роста» выявлено два SNP (LcRBContig00079 и LcRBContig00158) с процентом фенотипической изменчивости, объясняемой структурой популяции, 4,82–7,81 %. Благоприятные аллели данных маркеров статистически значимо ускоряют среднесуточный прирост растения на 0,41–2,55 см на ранних этапах развития. Высота растения играет ключевую роль при механизированной уборке чечевицы и влияет на результаты полученного урожая. Наличие SNP LcRBContig01123 значительно увеличивает данный показатель (на 1,77–7,95 см). На высоту расположения нижних бобов благоприятно оказывает влияние SNP LcRBContig0534, повышая ее на 0,30–3,48 см, что положительно сказывается на снижении производственных потерь зерна. Наличие благоприятных аллелей

LcRBContig00133 и LcRBContig00805 обеспечивает ветвление растения чечевицы по всему стеблю (3 балла), а не преимущественно в нижнем ярусе (7 баллов), что увеличивает его устойчивость и уменьшает разваливание куста, приводящее к значительному полеганию. Нерастрескиваемость бобов в период созревания входит в категорию важных показателей технологичности, для которого в ходе исследований также установлен ассоциированный SNP (LcRBContig00067). Положительный эффект данного маркера заключается в увеличении процента нерастрескиваемых бобов до 90 %.

В результате исследований определены образцы мелкосеменной чечевицы, обладающие наибольшим числом благоприятных аллелей и высокими показателями технологичности по сравнению со стандартами (табл. 3).

Таблица 3. Показатели пригодности к механизированной уборке образцов мелкосеменной чечевицы с максимальным числом благоприятных аллелей (в среднем за 2022–2024 гг.)
Table 3. Indicators of suitability for mechanical harvesting of the small-seeded lentil samples with the maximum number of favorable alleles (mean in 2022–2024)

Образец	Страна	Высота растения, см	Высота расположения бобов, см	Степень облиственности, %	Темп роста, см/сут.	Нерастрескиваемость бобов, %	Количество благоприятных аллелей, шт.
Пикантная, стандарт	Россия	27,22	14,23	47,23	0,79	81,76	4
Redcap	Канада	45,24	22,65	54,36	0,91	87,41	6
Pardina Linsen	Германия	44,63	19,64	45,15	0,64	86,67	6
Крапинка	Казахстан	33,54	19,81	51,42	0,62	84,29	4
Орловская краснозерная	Россия	38,65	18,03	45,34	0,64	86,67	6
КДЦ Кермит	Канада	43,42	19,87	54,63	0,65	86,71	5
Северная	Россия	33,21	20,35	73,54	0,68	84,92	4
Рубиновая	Россия	38,64	19,66	55,37	0,56	85,32	5
НСР ₀₅	4,52	3,62	2,12	0,09	2,94	–	

В нестабильных климатических условиях Омской области лучшие образцы мелкосеменной чечевицы, обладающие 4–6 благоприятными аллелями, достоверно превзошли сорт-стандарт по признакам пригодности к механизированной уборке, показав высоту растения 33,42 – 45,24 см, высоту расположения нижних бобов выше 18 см, степень облиственности от 45,15 до 73,54 %, слабую степень ветвистости, среднесуточный прирост 0,62–0,91 см/сут., оптимальный характер ветвления по всему стеблю и высокий процент нерастрескиваемости бобов (84,29–87,41 %).

Наличие благоприятных аллелей, ассоциированных со степенью ветвистости (LcRBContig00050), нерастрескиваемостью бобов (LcRBContig00067), высотой расположения нижних бобов (LcRBContig0534) и характером ветвления (LcRBContig00133) отмечено у всех отобранных образцов. У образцов КДЦ Кермит (Канада), Redcap (Канада), Pardina Linsen (Германия), Орловская краснозерная (Россия) и Рубиновая (Россия), помимо вышеперечисленных, зафиксированы благоприятные аллели, связанные с высотой рас-

тения (LcRBContig01123). Также у образцов Pardina Linsen (Германия) и Орловская краснозерная (Россия) отмечено наличие благоприятного аллеля степени облиственности (LcRBContig00065), а у образца Redcap (Канада) – темпа роста (LcRBContig00079).

Выводы.

1. Благоприятными для роста и развития оказались очень засушливые условия 2023 г., когда отмечен более компактный куст у растения чечевицы, связанный со слабой степенью ветвистости (1–4 ветви первого и последующего порядков), степенью облиственности менее 60 % и среднесуточным приростом менее 0,70 см в сутки и меньшим по сравнению с остальными годами представленными исследований растрескиванием бобов (10,93 %) на 6–7 %.

2. У изученных образцов мелкосеменной чечевицы отмечена широкая наследуемость признаков пригодности к механизированной уборке, превышающая 0,90.

3. Отмечена положительная корреляция высоты растения с высотой расположения нижних бобов ($r = 0,52$), степенью вет-

вистости ($r = 0,21$) и характером ветвления ($r = 0,16$). Характер ветвления оказал положительное влияние на степень ветвистости растения ($r = 0,23$) и его среднесуточный прирост ($r = 0,45$).

4. Зафиксирована отрицательная корреляция высоты расположения нижних бобов со степенью облиственности ($r = -0,26$), степени ветвистости с темпом роста ($r = -0,20$) и высотой растения ($r = -0,16$).

5. Однонуклеотидные полиморфизмы признаков «высота растения» и «высота расположения бобов» (LcRBContig01123 и LcRBContig0534) увеличивают их значение на 2–8 см, что положительно сказывается на снижении производственных потерь зерна. Наличие благоприятных аллелей LcRBContig00050 и LcRBContig00065 уменьшает вегетативную массу растения на 10–30 % за счет снижения степени ветвистости и облиственности, тем самым увеличивая устойчи-

вость к полеганию агрофитоценоза чечевицы в пределах 15–20 %. Благоприятные аллели LcRBContig00079 и LcRBContig00158 статистически значимо ускоряют среднесуточный прирост растения на 0,35–0,91 см на ранних этапах развития. Положительный эффект от SNP LcRBContig00067 заключается в увеличении процента нестрескиваемых бобов до 90 %.

6. Лучшие отобранные образцы мелкосеменной чечевицы показывали высоту растения 33,42–45,24 см, высоту расположения нижних бобов – выше 18 см, степень облиственности – от 45,15 до 73,54 %, слабую степень ветвистости, среднесуточный прирост 0,62–0,91 см/сут., оптимальный характер ветвления по всему стеблю и высокий процент нестрескиваемости бобов (84,29–87,41 %).

Финансирование. Научно-исследовательская работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-20033 (<https://rscf.ru/project/24-26-20033/>).

Библиографический список

1. Быкова В. А. Производство зерновых и зернобобовых культур в Сибирском федеральном округе в контексте обеспечения продовольственной безопасности // *Продовольственная политика и безопасность*. 2023. Т. 10, № 3. С. 471–482. DOI: 10.18334/ppib.10.3.118249
2. Дубина Е. В., Олимова З. К. Применение молекулярно-генетических методов в селекции риса на холодоустойчивость // *Зерновое хозяйство России*. 2025. Т. 17, № 1. С. 54–60. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-96-1-54-60
3. Корсаков Н. И., Адамова О. А., Будакова В. И. Методические указания по изучению коллекции зерновых бобовых культур. Л.: ВИР, 1975. 59 с.
4. Маракаева Т. В. Оценка образцов тарелочной чечевицы по хозяйственно-биологическим показателям // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2024. Т. 19, № 4(76). С. 49–55. DOI: 10.12737/2073-0462-2024-49-55
5. Fedoruk M. J., Vandenberg A., Bett K. E. Quantitative analysis of trait loci for mechanical harvesting suitability of lentils using single nucleotide polymorphism markers // *The Plant Genome*. 2013. Vol. 6(3), P. 1–10.
6. Chen X., Huang L., Fan J., Yan Sh., Zhou G., Zhang J. KASP-IEva: an intelligent typing evaluation model for KASP primers // *Frontiers in Plant Science*. 2024. Vol. 14, DOI: 10.3389/fpls.2023.1293599
7. Delaporta S. L., Wood J., Hicks J. B. A plant DNA miniprep: Version II // *Plant Molecular Biology Reporter*. 1983. Vol. 1(4), P. 19–21. DOI: 10.1007/bf02712670
8. Majeed U., Darwish E., Rehman S.U., Zhang X. Kompetitive allele specific PCR (KASP): a singleplex genotyping platform and its application // *Journal of Agricultural Science*. 2018. Vol. 11, P. 11–20. DOI: 10.5539/jas.v11n1p11
9. Rodda M. S., Sudheesh S., Javid M., Noy D., Gnanasambandam A., Slater A. T., Rosewarne G. M., Kaur S. Breeding for boron tolerance in lentil (*Lens culinaris* Medik.) using a high-throughput phenotypic assay and molecular markers // *Plant Breeding*. 2018. Vol. 137, P. 492–501. DOI: 10.1111/pbr.12608
10. Sharpe A. G., Ramsay L., Sanderson LA., Fedoruk M. J., Clarke W. E., Li R., Kagale S., Vijayan P., Vandenberg A., Bett K. E. Ancient orphan crop joins modern era: gene-based SNP discovery and mapping in lentil // *BMC Genomics*. 2013. Vol. 14(1), P. 1–13. DOI: 10.1186/1471-2164-14-192
11. Wang D., Li N., Wang X., Zhang X., Li R., Pu Y., Li Z., Tian Q., Ding H., Yang T., Liu R., Li G., Huang Y., Ji Y., Zong X., Sarker A. RNA-Seq analysis and development of SSR and KASP markers in lentil (*Lens culinaris* Medikus subsp. *culinaris*) // *The Crop Journal*. 2020. Vol. 8(6), P. 953–965. DOI: 10.1016/j.cj.2020.04.007

References

1. Bykova V. A. Proizvodstvo zernovykh i zernobobovykh kul'tur v Sibirskom federal'nom okruge v kontekste obespecheniya prodovol'stvennoi bezopasnosti [Production of grain and legume crops in the Siberian Federal District to enforce food security] // *Prodovol'stvennaya politika i bezopasnost'*. 2023. T. 10, № 3. S. 471–482. DOI: 10.18334/ppib.10.3.118249
2. Dubina E. V., Olimova Z. K. Primenenie molekulyarno-geneticheskikh metodov v selektsii risa na kholodoustoichivost' [Application of molecular genetic methods in rice breeding for cold resistance] // *Zernovoe khozyaistvo Rossii*. 2025. T. 17, № 1. S. 54–60. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-96-1-54-60
3. Korsakov N. I., Adamova O. A., Budakova V. I. Metodicheskie ukazaniya po izucheniyu kolleksii zernovykh bobovykh kul'tur [Methodological recommendations for studying a collection of grain legumes]. L.: VIR, 1975. 59 s
4. Marakaeva T. V. Otsenka obraztsov tarelochnoi chechevitsy po khozyaistvenno-biologicheskim pokazatelyam [Estimation of plate lentil samples for economic and biological indicators] // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2024. T. 19, № 4(76). S. 49–55. DOI: 10.12737/2073-0462-2024-49-55

5. Fedoruk M. J., Vandenberg A., Bett K. E. Quantitative analysis of trait loci for mechanical harvesting suitability of lentils using single nucleotide polymorphism markers // *The Plant Genome*. 2013. Vol. 6(3), P. 1–10.
6. Chen X., Huang L., Fan J., Yan Sh., Zhou G., Zhang J. KASP-IEva: an intelligent typing evaluation model for KASP primers // *Frontiers in Plant Science*. 2024. Vol. 14, DOI: 10.3389/fpls.2023.1293599
7. Delaporta S. L., Wood J., Hicks J. B. A plant DNA miniprep: Version II // *Plant Molecular Biology Reporter*. 1983. Vol. 1(4), P. 19–21. DOI: 10.1007/bf02712670
8. Majeed U., Darwish E., Rehman S.U., Zhang X. Kompetitive allele specific PCR (KASP): a singleplex genotyping platform and its application // *Journal of Agricultural Science*. 2018. Vol. 11, P. 11–20. DOI:10.5539/jas.v11n1p11
9. Rodda M. S., Sudheesh S., Javid M., Noy D., Gnanasambandam A., Slater A. T., Rosewarne G. M., Kaur S. Breeding for boron tolerance in lentil (*Lens culinaris* Medik.) using a high-throughput phenotypic assay and molecular markers // *Plant Breeding*. 2018. Vol. 137, P. 492–501. DOI: 10.1111/pbr.12608
10. Sharpe A. G., Ramsay L., Sanderson LA., Fedoruk M. J., Clarke W. E., Li R., Kagale S., Vijayan P., Vandenberg A., Bett K. E. Ancient orphan crop joins modern era: gene-based SNP discovery and mapping in lentil // *BMC Genomics*. 2013. Vol. 14(1). P. 1–13. DOI: 10.1186/1471-2164-14-192
11. Wang D., Li N., Wang X., Zhang X., Li R., Pu Y., Li Z., Tian Q., Ding H., Yang T., Liu R., Li G., Huang Y., Ji Y., Zong X., Sarker A. RNA-Seq analysis and development of SSR and KASP markers in lentil (*Lens culinaris* Medikus subsp. *culinaris*) // *The Crop Journal*. 2020. Vol. 8(6), P. 953–965. DOI: 10.1016/j.cj.2020.04.007

Поступила: 13.05.25; доработана после рецензирования: 23.06.25; принята к публикации: 24.06.25.

Критерии авторства. Автор статьи подтверждает, что имеет на статью полное право и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Авторский вклад. Маракаева Т. В. – выполнение полевых и лабораторных опытов, сбор данных, концептуализация исследования, анализ данных и их интерпретация, подготовка рукописи.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.