

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 633.854.78
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-01



Модификационная изменчивость содержания основных жирных кислот в семенах высокостеариновых линий подсолнечника в различных условиях выращивания

Ю. В. Чебанова¹, Я. Н. Демури¹, И. В. Киров²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В.С. Пустовойта, Краснодар, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Юлия Владимировна Чебанова, aqvablu@mail.ru

Актуальность. Высокостеариновый подсолнечник рассматривается как альтернатива импортируемому пальмовому маслу при производстве твердых растительных жиров в пищевой промышленности. Целью исследований стало изучение фенотипической изменчивости состава основных жирных кислот в семенах отечественных линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37 с высоким содержанием стеариновой и олеиновой жирных кислот в различных экологических условиях выращивания, включая камеру гидропоники.

Материалы и методы. В исследовании использовали высокостеариновые высокоолеиновые линии генетической коллекции подсолнечника Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур имени В.С. Пустовойта: ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37. Линии выращивали в полевых условиях в 2023 и 2024 г., а также в двух сезонах камеры гидропоники в 2024 и 2025 г. С использованием метода газожидкостной хроматографии определяли состав основных жирных кислот в масле 10 отдельных семян изучаемых образцов.

Результаты. У изученных линий содержание стеариновой кислоты увеличилось на 10,2–12,1%, а олеиновой кислоты снизилось на 16,6–16,8% в условиях камеры гидропоники по отношению к полевым условиям. Уровень пальмитиновой кислоты был более стабильным, и изменчивость не имела подобной закономерности. С использованием ANOVA выявлено достоверное влияние условий года на уровень всех основных жирных кислот. Наиболее высокая доля влияния условий установлена для стеариновой и олеиновой кислот: 85 и 67% соответственно. Для признака содержания стеариновой кислоты обнаружена сильная отрицательная корреляция с максимальной и среднесуточной температурой воздуха ($r = -0,94$ и $r = -0,85$), тогда как с минимальной температурой отмечена положительная связь ($r = 0,86$).

Заключение. Установлено значительное модификационное увеличение содержания стеариновой и снижение олеиновой кислот в масле семян высокостеариновых линий подсолнечника при выращивании в условиях камеры гидропоники по отношению к полевым условиям.

Ключевые слова: жирная кислота, мутация, фенотипическая изменчивость, стеариновая кислота, гидропоника, температура, корреляция

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке проекта 082-3-2023-0005 в части проведения опытов в условиях камеры гидропоники и гранта РФ № 22-64-00076 в части изучения жирнокислотного состава семян.

Для цитирования: Чебанова Ю.В., Демури Я.Н., Киров И.В. Модификационная изменчивость содержания основных жирных кислот в семенах высокостеариновых линий подсолнечника в различных условиях выращивания. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):148-157. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-01

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-01

Phenotypic plasticity of essential fatty acid content in seeds of high-stearic sunflower lines under different growing conditions

Yulia V. Chebanova¹, Yakov N. Demurin¹, Ilya V. Kirov²¹V.S. Pustovoit All-Russia Research institute of Oil Crops, Krasnodar, Russia²All-Russia Research institute of Agricultural Biotechnology, Moscow, Russia**Corresponding author:** Yulia V. Chebanova, aqvablue@mail.ru

Background. High-stearic sunflower is seen as an alternative to imported palm oil in the industrial production of solid vegetable fats. Wide phenotypic variability of fatty acid content in sunflower seeds under the influence of various growing conditions was described. In mutant high-stearic lines CAS-4 and CAS-8, a negative relationship between temperature and stearic acid content was observed. The objective was to study the phenotypic variability of essential fatty acid composition in the seeds of lines LG34, LG36 and LG37 with high content of stearic and oleic fatty acids under various environmental conditions and a hydroponic system.

Materials and methods. The study employed high-stearic and high-oleic lines LG34, LG36 and LG37 from the sunflower genetic collection of the Pustovoit Institute. They were grown in the field in 2023 and 2024, as well as in a hydroponic growth chamber for two seasons (2024 and 2025). Gas-liquid chromatography was used to analyze the composition of essential fatty acids in the oil of 10 individual achenes of the studied samples.

Results. Stearic acid content in the studied lines increased by 10.2–12.1%, and oleic acid content decreased by 16.6–16.8% in the hydroponic system, when compared to the field conditions. The level of palmitic acid was more stable, and its variability did not show such a pattern. ANOVA helped to reveal a significant effect of the year's conditions on the level of all essential fatty acids. The highest share of the environmental effect was recorded for stearic and oleic acids: 85% and 67%, respectively. For stearic acid content, a strong negative correlation was found with the maximum and mean daily air temperatures ($r = -0.94$ and $r = -0.85$), and a strong positive one with the minimum temperature ($r = 0.86$).

Conclusion. An increase in stearic acid content and a decrease in oleic acid content in the oil of the seeds of high-stearic sunflower lines LG34, LG36, and LG37 was established for the hydroponic conditions.

Keywords: fatty acid, mutation, phenotypic variability, stearic acid, hydroponics, temperature, correlation

Acknowledgments: this research was funded by Project #082-3-2023-0005 for hydroponic growth chamber experiments and by the Russian Science Foundation (Grant No. 22-64-00076) for studying the fatty acid composition of seeds.

For citation: Chebanova Yu.V., Demurin Ya.N., Kirov I.V. Phenotypic plasticity of essential fatty acid content in seeds of high-stearic sunflower lines under different growing conditions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):148-157. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-01

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Подсолнечник является одним из главных источников пищевых растительных масел. Данную культуру выращивают в 72 странах, из которых наша страна является крупнейшим производителем (Rauf, 2019). В 2024 г. мировое производство семян подсолнечника составило около 52 млн тонн и 32% из них (18 млн тонн) были произведены в Российской Федерации (<https://ipad.fas.usda.gov/cropeplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=2224000>).

Традиционное подсолнечное масло содержит в сумме до 90% мононенасыщенной олеиновой (C18:1) и полиненасыщенной линолевой (18:2) жирных кислот. На другие кислоты приходится около 10%; основными из них являются насыщенные пальмитиновая (C16:0) и стеариновая (C18:0). После открытия мутаций высокоолеиновости (Soldatov et al., 1976), высокопальмитиновости и высокостеариновости (Ivanov et al., 1988; Mancha et al., 1994; Osorio et al., 1995) появились новые направления селекции подсолнечника. Подсолнечное масло с высоким содержанием стеариновой и олеиновой кислот может стать полезной альтернативой тропическому пальмовому маслу с высоким содержанием пальмитиновой кислоты, благодаря высокой окислительной стабильности и твердому состоянию. Во Всероссийском научно-исследовательском институте масличных культур имени В.С. Пустовойта (ВНИИМК) впервые в России были выведены линии-доноры с одновременно высоким содержанием стеариновой и олеиновой кислот (Chebanova et al., 2025).

Жирнокислотный состав масла семян подсолнечника определяется рядом факторов, основным из которых является генотип растения. С другой стороны, многие авторы отмечали широкую фенотипическую изменчивость содержания жирных кислот под влиянием различных условий выращивания растений подсолнечника. Наиболее значимым модификационным фактором при этом является температура воздуха в период созревания семян, которая положительно коррелирует с содержанием олеиновой кислоты и отрицательно – с линолевой. В ряде экспериментальных статей показана динамика накопления жирных кислот при созревании семян. Так, ключевым этапом в данном процессе биосинтеза жирных кислот установлен период в течение 20 дней после цветения (Guo et al., 2024).

Существуют разные мнения о том, какая циркадная температура в большей степени определяет состав жирных кислот. Колебание концентрации олеиновой кислоты в полевых условиях лучше всего объясняется максимальной (Seiler, 1983), минимальной (Rochester, Silver, 1983; Harris et al., 1989) или среднесуточной температурой (Nagao, Yamazaki, 1984). N. Izquierdo et al. (2002) пришли к выводу, что наиболее значимой температурой для определения изменчивости концентрации C18:1 является именно ночная температура. Повышение температуры может также приводить к снижению концентрации насыщенных жирных кислот (Izquierdo, Aguirrezabal, 2008). Процентное содержание линолевой, олеиновой и стеариновой кислот в семенах гибридов существенно различалось в разных регионах произрастания (Turhan et al., 2010), в то время как содержание пальмитиновой кислоты оставалось практически постоянным (Lajara et al., 1990).

Испанские ученые изучали влияние температуры выращивания на соотношение жирных кислот в семенах

мутантных линий с высоким содержанием стеариновой кислоты. Уровень C18:0 в семенах контрольной линии снижался с 5,4 до 3,2% при повышении температуры выращивания, а уровень C16:0 оставался постоянным. У высокостеариновых линий CAS-4 и CAS-8 была описана отрицательная зависимость между температурой и содержанием C18:0. (Martínez-Force et al., 1998). Жирнокислотный состав другой мутантной высокостеариновой линии CAS-14 определяли в контролируемых условиях среды при различных дневных и ночных температурах. При выращивании данной линии в прохладных условиях при температурных режимах 20/10 и 25/15°C содержание стеариновой кислоты было на уровне стандартной линии – около 6,7–7,8%. При режиме 30/20°C наблюдали большую изменчивость в отдельных семенах – 5,2–33,4%. Максимальное содержание стеариновой кислоты 25,8–43,0% достигалось при высокой температуре 39/24°C. Такая закономерность полностью противоположна установленной ранее для других высокостеариновых мутантных линий CAS-4 и CAS-8 в предыдущих исследованиях (Fernández-Moya et al., 2002). Следовательно, мутационное повышение содержания стеариновой кислоты у линии CAS-14 является в значительной степени термозависимым.

Первые исследования изменчивости содержания C18:0 у линий ЛГ31, ЛГ32 и ЛГ33 из генетической коллекции ВНИИМК под влиянием погодных условий показали, что признак повышенного содержания стеариновой кислоты в масле семян подсолнечника экологически стабилен и не зависит от условий выращивания этих линий в полевых условиях. В нашей дальнейшей работе были получены новые линии ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37 с более высоким содержанием стеариновой кислоты, для которых аналогичное изучение варибельности состава жирных кислот не проводили.

Во ВНИИМК в 2023 г. была запущена камера гидропоники для выращивания подсолнечника. Эта камера позволила создать контролируемые условия, отличающиеся по температуре воздуха от полевых (Demurin et al., 2024). В связи с данными техническими возможностями целью исследований стало изучение фенотипической изменчивости состава основных жирных кислот в семенах линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37 с высоким содержанием стеариновой и олеиновой жирных кислот в различных экологических условиях выращивания.

Материалы и методы

Исследования проведены во ВНИИМК, в лаборатории генетики отдела селекции и первичного семеноводства подсолнечника в период 2023–2025 гг. опыты закладывали в полевых условиях на 2-м отделении в хуторе Октябрьском г. Краснодара в 2023 и 2024 г. и в камере гидропоники в 2024 и 2025 г.

Для создания благоприятных микроклиматических условий в камере гидропоники использовали системы кондиционирования и осушения воздуха. Контроль температуры и влажности воздуха осуществляли с помощью электронных систем, установленных в камере. Влажность воздуха поддерживали на уровне 50–60%. Фотопериод составил 16 часов – день, 8 часов – ночь. В качестве субстрата использовали маты, кубики и пробки из минеральной ваты. Полив растений производили с использованием специализированной установки полива на базе автоматизированной системы дозирования удобрений L-502.

В полевых условиях растения выращивали по стандартной схеме при густоте стояния 40 тыс. растений на гектар. Опытные делянки включали два ряда по 25 растений каждый. Растения, отобранные для изучения, принудительно самоопыляли под индивидуальными изоляторами и после созревания семян обмолачивали отдельно каждую корзинку. В камере гидропоники опытная делянка включала 6 растений каждой линии в одном мате из минеральной ваты. Опыление и уборку растений проводили по сходной методике.

По комплексу погодных условий 2023 и 2024 г. существенно различались – как по среднесуточным температурам, так и по условиям увлажнения. Так, 2024 г. был во все месяцы, кроме мая, теплее среднесуточной нормы на 1,7–5,5°C, и в целом за вегетационный период (ВП) превышение составило 2,5°C (рис. 1). В 2023 г. отклонение от климатической нормы было ниже. Однако, несмотря на все различия, в августе в оба года исследованной среднесуточная температура была сходной и превышала среднесуточное значение на 1,7–2,6°C.

рактировался как влагообеспеченный, а 2024 г. – как сухой (см. табл. 1).

Наиболее важным периодом в формировании жирнокислотного состава масла являются 30 дней после цветения (ДПЦ), то есть этап созревания семян. На рисунке 2 видно, что интервал изменения температур в течение суток в полевых условиях значительно выше, чем в камере гидропоники. Так, разность между минимальными и максимальными температурами в 2023 г. составила 12,7°C, а в 2024 г. – 14,3°C. В условиях камеры гидропоники данный интервал был намного ниже и составил 4,0–5,3°C. Такая изменчивость связана с тем, что в гидропонике минимальная ночная температура выше, чем в поле, а максимальная температура значительно ниже за счет постоянного охлаждения камеры до необходимой температуры.

Материалом для изучения послужили инбредные линии генетической коллекции ВНИИМК, созданные в период с 2018 по 2023 г. Данные линии содержат 17–21% C18:0 и 60–69% C18:1. Все линии относятся к сред-

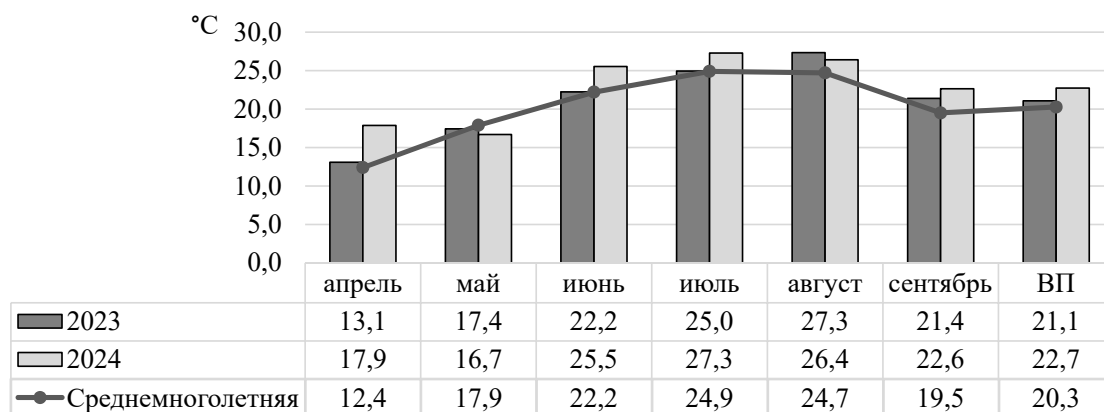


Рис. 1. Среднесуточная температура воздуха в течение вегетационного периода в 2023 и 2024 г., °C

Fig. 1. Mean daily air temperature during the growing seasons in 2023 and 2024, °C

Количество осадков, выпавших за период вегетации подсолнечника в разные годы исследований, сильно различалось (табл. 1). В 2023 г. в течение вегетационного периода выпало на 31,6 мм больше среднесуточной нормы, тогда как в 2024 г. данный показатель был ниже нормы на 221,8 мм. Наиболее сильные различия наблюдали в апреле и июле, тогда как в августе и сентябре в оба года исследований осадков было мало.

Уровень влагообеспеченности устанавливали по гидротермическому коэффициенту увлажнения Г. Т. Селянинова (ГТК) (Ionova et al., 2016). Согласно ГТК 2023 г. ха-

ней группе спелости и являются ветвистыми линиями – восстановителями фертильности пыльцы при ЦМС РЕТ1.

Определение жирнокислотного состава семян проводили с использованием метода газожидкостной хроматографии метиловых эфиров на приборе «Хроматэк-Кристалл 2000». Получение метиловых эфиров и их хроматографирование выполняли в соответствии с ГОСТ (GOST 31663-2012..., 2019; GOST 31665-2012..., 2019). Для определения состава жирных кислот в отдельных семенах использовали по 10 семян.

Таблица 1. Условия увлажнения в период полевых исследований, хут. Октябрьский, Краснодар, 2023–2024 гг.

Table 1. Moisture conditions during the field research period, Oktyabrsky Farmstead, Krasnodar, 2023–2024

Параметр	Год	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	ВП
Количество осадков, мм	2023	93,6	101,6	74,2	102,4	1,0	13,4	386,2
	2024	5,2	71,0	6,4	15,6	14,6	20,0	132,8
	Среднее многолетнее	48,4	67,1	80,5	66,2	40,7	51,7	354,6
ГТК	2023	2,4	1,9	1,1	1,3	0,0	0,2	1,0
	2024	0,1	1,4	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3

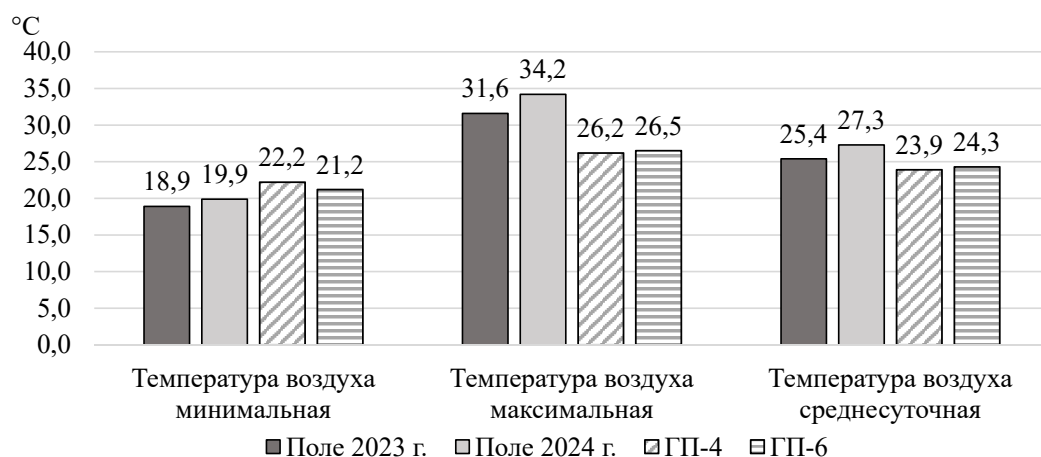


Рис. 2. Показатели температуры воздуха (°C) в период 30 дней после цветения в полевых и гидропонных (ГП) условиях

Fig. 2. Air temperature (°C) during the 30-day period after flowering in the field and in the hydroponic system (ГП)

Математическую обработку данных проводили с использованием ANOVA в Excel и программной среды R версии 4.3.1., а тест на нормальность остаточных значений – методом Шапиро – Уилка с помощью функции shapiro.test для определения обоснованности проведения дисперсионного анализа. Для визуализации данных использовали программу Excel и R (версии 4.3.1.).

Результаты

Определение влияния условий выращивания на жирнокислотный состав масла семян растений трех линий

ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37 проводили в полевых условиях два года. Также в двух циклах гидропоники (ГП4 и ГП6) были выращены растения тех же линий. При этом в ГП4 и полевых условиях 2024 г. выращивали растения из потомства одного растения I₇, урожая 2023 г. Растения в ГП6 выращивали из семян растения I₈, которое было отобрано для изучения в 2024 г.

После определения состава жирных кислот в отдельных семенах было установлено, что значения стеариновой и олеиновой кислот достоверно различались в семенах растений, выращенных в полевых условиях и в камере гидропоники (табл. 2, рис. 3). Кроме того, для линии

Таблица 2. Содержание основных жирных кислот (%) в масле семян линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37 при выращивании в полевых и гидропонных (ГП) условиях

Table 2. Essential fatty acid content (%) in the seed oil of lines LG34, LG36 and LG37 grown in the field and in the hydroponic system (ГП)

Жирная кислота	Поле, 2023 г.			Поле, 2024 г.			ГП4			ГП6			НСР ₀₅
	\bar{x}	min	max	\bar{x}	min	max	\bar{x}	min	max	\bar{x}	min	max	
ЛГ34													
C16:0	6,4	5,8	7,4	5,8	5,4	6,2	5,1	4,9	5,5	4,9	4,5	5,1	0,3
C18:0	17,3	16,0	18,4	17,8	14,8	19,1	29,9	26,1	34,4	28,8	27,1	31,1	1,4
C18:1	65,2	51,7	70,3	69,1	66,8	70,5	52,3	32,6	58,1	53,2	34,1	59,0	5,1
C18:2	6,4	2,4	18,3	3,0	2,1	4,2	7,4	2,4	32,1	7,5	3,0	25,2	4,9
ЛГ36													
C16:0	6,0	5,6	6,2	5,8	5,2	6,7	5,6	5,3	6,1	3,7	2,6	4,6	0,4
C18:0	19,7	18,0	21,1	19,1	16,1	21,0	31,0	29,1	33,6	30,2	26,6	34,4	1,5
C18:1	66,2	62,0	67,8	68,1	66,7	70,5	51,5	45,5	56,1	50,5	38,8	58,4	1,3
C18:2	3,5	2,1	9,0	2,5	1,9	4,0	6,1	3,5	10,9	10,2	4,1	18,3	2,3
ЛГ37													
C16:0	6,9	6,4	7,6	6,4	5,9	7,2	6,3	5,8	6,8	5,9	4,9	6,8	0,4
C18:0	21,7	16,3	25,7	19,7	16,5	22,4	29,9	24,1	32,2	33,3	28,5	37,4	2,4
C18:1	60,6	51,3	68,8	65,7	63,6	68,4	49,0	44,9	53,3	43,1	26,8	53,4	4,4
C18:2	5,1	2,7	15,6	3,2	2,4	5,7	8,4	4,4	16,9	12,1	5,5	24,8	3,6

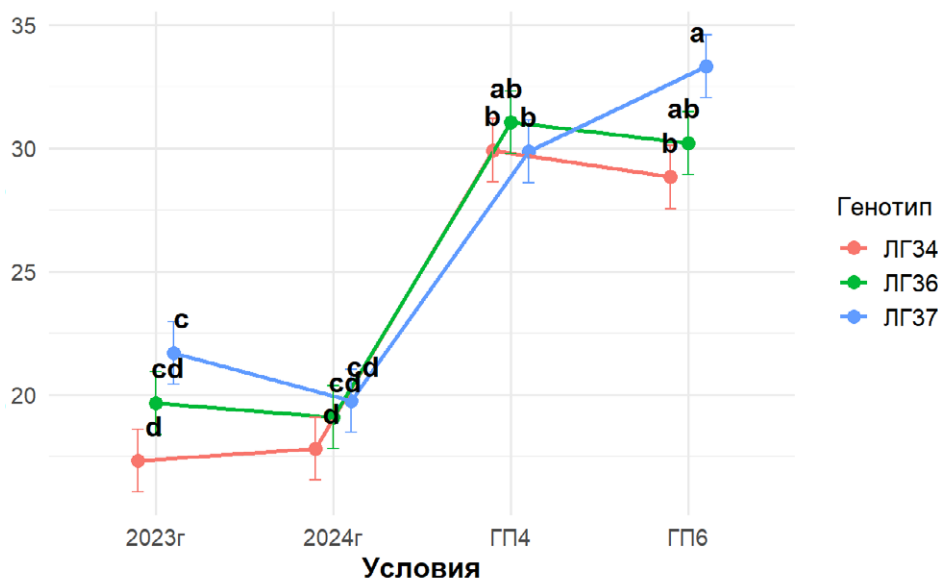


Рис. 3. Распределение генотипов по содержанию стеариновой кислоты при выращивании в полевых и гидропонных (ГП) условиях ($p < 0,05$)

Fig. 3. Distribution of genotypes according to their stearic acid content under field and hydroponic (ГП) conditions ($p < 0.05$)

ЛГ37 также наблюдали значимые отличия по содержанию стеариновой кислоты в двух поколениях в гидропонике.

Для всех трех линий изменение соотношения жирных кислот имело сходные направления (рис. 4). Так, в условиях гидропонии уровень стеариновой и линолевой кислоты увеличивался, тогда как содержание олеиновой кислоты снижалось. Уровень пальмитиновой кислоты был более стабильным.

Для линии ЛГ34 в семенах поколения I_8 , выращенных в полевых и гидропонных условиях, разность значений по стеариновой кислоте составила 12,1%, по олеиновой кислоте – 16,8%, а по пальмитиновой и линолевой кислотам была незначительной. В ГП4 у линии ЛГ36 увеличилось содержание стеариновой кислоты на 11,9%, линолевой – на 3,6%, а уровень олеиновой снизился на 16,6%.

Сходные значения разности в жирнокислотном составе установлены и для линии ЛГ37: уровень стеариновой кислоты увеличивался в условиях гидропонии до 10,2%, олеиновая кислота снизилась на 16,7%, а линолевая кислота увеличивалась на 5,2%. Достоверное снижение содержания пальмитиновой кислоты на 0,7% установлено только для линии ЛГ34.

С использованием двухфакторного дисперсионного анализа было установлено, что влияние генотипа на соотношение основных жирных кислот достоверно для пальмитиновой, стеариновой и олеиновой кислот в полевом опыте (табл. 3), тогда как влияние условий года достоверно для пальмитиновой, олеиновой и линолевой жирных кислот.

Подобное сравнение силы влияния условий было проведено также для двух циклов гидропонии. Установ-

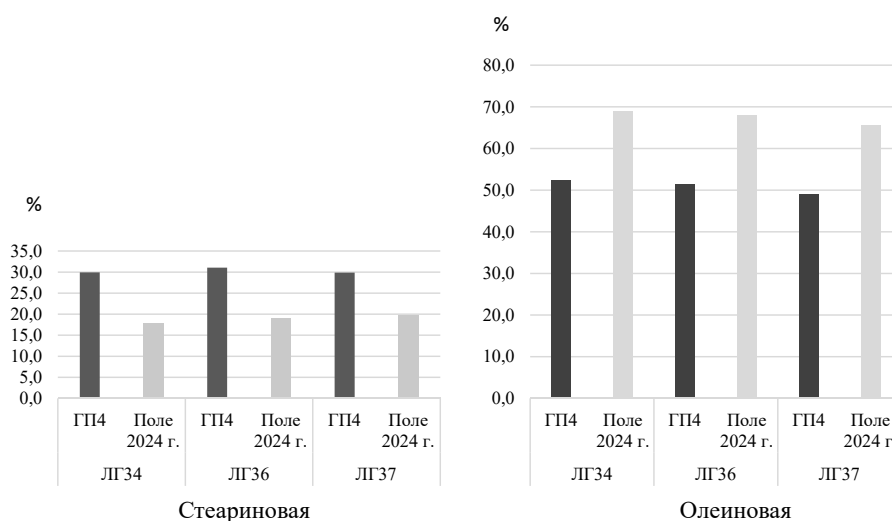


Рис. 4. Разность содержания по стеариновой и олеиновой жирным кислотам в семенах линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37 поколения I_8 при выращивании в полевых и гидропонных (ГП) условиях

Fig. 4. Difference in the content of stearic and oleic fatty acids in the seeds of lines LG34, LG36 and LG37 (generation I_8) grown under field and hydroponic (ГП) conditions

Таблица 3. Влияние условий года и генотипа на содержание основных жирных кислот в масле семян линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37 при выращивании в полевых и гидропонных (ГП) условиях**Table 3.** The effect of the year's conditions and the genotype on the content of essential fatty acids in the seed oil of lines LG34, LG36 and LG37 grown under field and hydroponic (ГП) conditions

Источник вариации	C16:0		C18:0		C18:1		C18:2	
	<i>p-value</i>	η , %	<i>p-value</i>	η , %	<i>p-value</i>	η , %	<i>p-value</i>	η , %
В полевых условиях (2023 и 2024 г.)								
Год	< 0,01	13,7	0,16	–	< 0,01	19,2	< 0,01	13,0
Генотип	< 0,01	37,9	< 0,01	33,3	< 0,01	20,8	0,14	–
Взаимодействие	0,13	–	0,11	–	0,3	–	0,35	–
В условиях камеры гидропоники (ГП4 и ГП6)								
Условия	< 0,01	21,3	0,38	–	0,24	–	0,10	–
Генотип	< 0,01	44,2	0,01	12,9	< 0,01	16,3	0,31	–
Взаимодействие	< 0,01	16,3	< 0,01	16,8	0,26	–	0,52	–
В полевых условиях (2023 и 2024 г.) и в камере гидропоники (ГП4 и ГП6)								
Условия	< 0,01	43,1	< 0,01	85,0	< 0,01	67,4	< 0,01	24,8
Генотип	< 0,01	27,6	< 0,01	3,2	< 0,01	5,7	0,26	–
Взаимодействие	< 0,01	11,5	< 0,01	1,9	0,34	–	0,47	–

лено, что влияние экологических условий достоверно только для содержания пальмитиновой кислоты, тогда как доля генотипической изменчивости значима для пальмитиновой, стеариновой и олеиновой жирных кислот (см. табл. 3).

Однако при интегративном сравнении содержания основных жирных кислот при выращивании в течение двух лет в полевых условиях и в двух циклах гидропоники с использованием ANOVA выявили достоверное влияние экологического фактора на уровень всех изучаемых жирных кислот. Наиболее высокая доля влияния условий выявлена для стеариновой и олеиновой кислот (85 и 67% соответственно). Генотипические различия были выявлены для пальмитиновой, стеариновой и олеиновой жирных кислот, однако их вклад был значительно ниже (см. табл. 3).

Всю совокупность данных жирнокислотного состава семян трех линий, выращенных в различных условиях, представили на графике с использованием метода главных компонент (PCA), где обнаружили разделение всех значений на две группы (рис. 5). В первую вошли наблюдения по всем линиям, выращенным в полевых условиях, а во вторую – по всем линиям, выращенным в условиях камеры гидропоники. Следовательно, наиболее важным фактором, оказавшим влияние на состав жирных кислот изучаемых линий в данном исследовании, является фактор среды.

В результате оценки линейной корреляции установлены разнонаправленные взаимосвязи содержания основных жирных кислот с температурными показателями в полевых и гидропонных условиях (табл. 4). Наиболее сильную отрицательную корреляцию обнаружили для содержания стеариновой кислоты с максимальной и среднесуточной температур воздуха ($r = -0,94$ и $r = -0,85$), тогда как с понижением минимальной температуры наблюдали сильную положительную взаимосвязь ($r = 0,86$).

Противоположные связи установлены для признака содержания олеиновой кислоты, который положительно коррелирует с повышением среднесуточной и максимальной температуры ($r = 0,87$ и $r = 0,94$) и отрицательно связан с понижением минимальной температуры ($-0,78$). Для содержания линолевой кислоты установлена достоверная отрицательная корреляция с повышением среднесуточной и максимальной температурой ($r = -0,84$ и $r = -0,79$). Между содержанием пальмитиновой кислоты и температурой воздуха в период налива семян не обнаружили достоверной связи.

Обсуждение

Согласно климатической теории маслообразовательного процесса, разработанной С. Л. Ивановым, растения, произрастающие в более северных регионах, накапливают в семенах больше ненасыщенных жиров, что позволяет семенам сохранять жизнеспособность в период покоя и прорастания даже при низких температурах (Ivanov, 1961). Данная закономерность проявляется на межвидовом уровне. Для вида *Heliantus annuus* L. подобная зависимость отмечена и на внутривидовом уровне. Разными авторами была установлена сильная корреляция содержания олеиновой и линолевой жирных кислот в составе масла семян от температуры в период налива семян (Rochester, Silver, 1983; Seiler, 1983; Nagao, Yamazaki, 1984; Harris et al., 1989). Так, семена традиционных сортов и гибридов подсолнечника содержат более высокую долю линолевой кислоты (C18:2) при выращивании в холодных условиях, тогда как эти же сорта и гибриды в жарких условиях показывают сравнительно более высокую долю олеиновой кислоты (C18:1) в масле семян.

Мутационная изменчивость жирнокислотного состава не всегда согласуется с общими закономерностями. Установлено, что мутации высокоолеиновости *Ol* и высокостеариновости *es1*, *es2* и *es3* являются термозависимы-

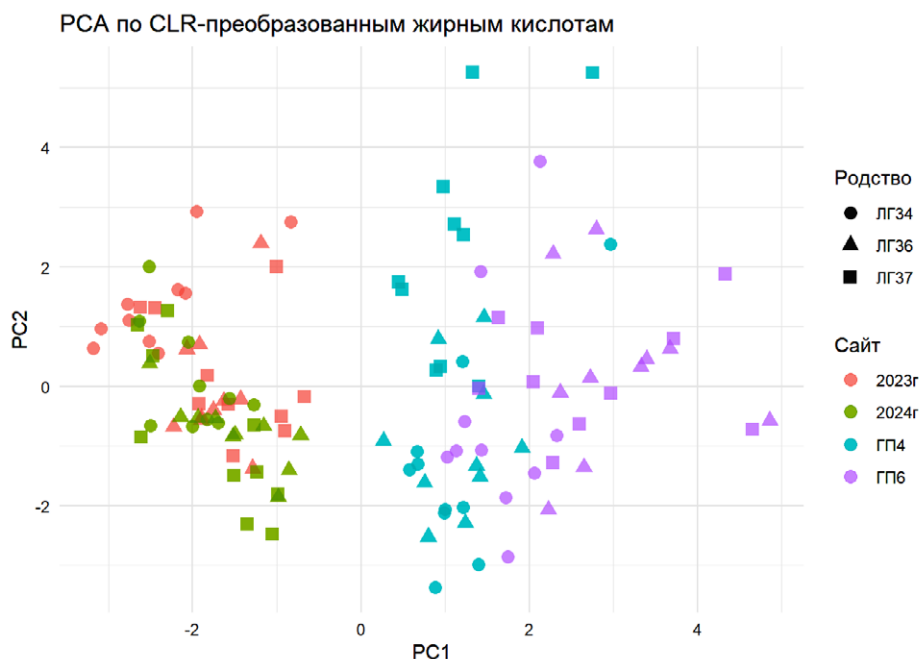


Рис. 5. PCA по жирным кислотам масла семян линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37 при выращивании в полевых и гидропонных (ГП) условиях

Fig. 5. PCA for fatty acids of the seed oil of lines LG34, LG36 and LG37 grown under field and hydroponic (ГП) conditions

Таблица 4. Линейная корреляция содержания основных жирных кислот и температуры воздуха

Table 4. Linear correlation between the content of essential fatty acids and air temperature

	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2
Средняя минимальная температура воздуха, °С	-0,49	0,86*	-0,78*	0,57
Средняя максимальная температура воздуха, °С	0,52	-0,94*	0,94*	-0,84*
Среднесуточная температура воздуха, °С	0,38	-0,85*	0,87*	-0,79*

ми, однако направления изменения состава жирных кислот имеют разнонаправленный характер. С другой стороны, известна термостабильная мутация высокоолеиновости у линии подсолнечника NM1 (Alberio et al., 2015).

У ОI высокоолеиновых образцов подсолнечника в более холодных условиях наблюдается снижение доли C18:1, но размах вариации данного признака ниже в сравнении с традиционными по составу масла образцами. В данной работе также выявлена сильная положительная взаимосвязь содержания олеиновой кислоты с максимальной и среднесуточной температурами в период налива семян. При выращивании в прохладных условиях камеры гидропоники содержание олеиновой кислоты в среднем снижалось на 16,7% относительно результатов, полученных при выращивании растений в полевых опытах.

Закономерность изменения содержания стеариновой кислоты у высокоолеиновых линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37 имеет сходный характер с данными, описанными в исследовании испанских ученых для мутантных высокоолеиновых линий CAS-4 и CAS-8 (Fernández-Moya et al., 2002). Однако интервал изменения доли стеариновой кислоты в нашем опыте с использованием камеры гидропоники был выше. Испанские линии и линии из коллекции ВНИИМК в прохладных условиях показывали более высокое содержание стеариновой кислоты – в среднем на 8 и 10–12% соответственно.

Более высокое накопление стеариновой кислоты у высокоолеиновых линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37, вероятно, связано с тем, что активность стеариноил-АЦП-десатуразы SAD при более низких температурах в период налива семян ниже, чем β -кетоацил-АПБ-синтетаза II (KAS II), поэтому часть стеариноил-АПБ, продуцируемого KAS II, не десатурируется стеариноил-АЦП-десатуразой (SAD) в олеиновую кислоту, а накапливается внутри пластиды и доступна для экспорта для использования в синтезе триацилглицеридов. При этом, несмотря на наличие мутации высокоолеиновости, десатурация олеиновой кислоты в линолеовую проходит более эффективно в прохладных условиях.

Заключение

Содержание основных жирных кислот изменяется при выращивании в различных экологических условиях. Уровень пальмитиновой кислоты наиболее стабилен при изменении условий среды, тогда как содержание стеариновой и олеиновой жирных кислот показало максимальную изменчивость. В условиях камеры гидропоники у высокоолеиновых высокоолеиновых линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37 содержание стеариновой кислоты увеличилось на 10,2–12,1%, а уровень олеиновой кислоты снизился на 16,6–16,8%, что, вероятно, связано с более низкой среднесуточной температурой в период созревания

семян. Влияние факторов окружающей среды обуславливает до 85% изменчивости стеариновой кислоты и около 67% вариации содержания олеиновой кислоты. Установлена сильная отрицательная корреляция содержания стеариновой кислоты со среднесуточной и максимальной дневной температурой, а также тесная положительная связь между минимальной ночной температурой и уровнем этого признака у высокостеариновых высокоолеиновых линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37.

References / Литература

- Alberio C., Izquierdo N.G., Galella T., Zuil S., Reid R., Zambelli A. Et al. A new sunflower high oleic mutation confers stable oil grain fatty acid composition across environments. *European Journal of Agronomy*. 2016;73;25-33. DOI: 10.1016/j.eja.2015.10.003
- Chebanova Yu.V., Zemtseva T.A., Demurin Ya.N. Sunflower parent breeding material with a high content of stearic acid. *Oil Crops*. 2025;1(201);21-28. [in Russian] (Чебанова Ю.В., Земцева Т.А., Демури́н Я.Н. Исходный селекционный материал подсолнечника с высоким содержанием стеариновой кислоты. *Масличные культуры*. 2025;1(201);21-28). DOI: 10.25230/2412-608X-2025-1-201-21-28
- Demurin Ya.N., Peretyagina T.M., Chebanova Yu.V., Konnov N.A., Shirokikh A.A., Sarkisyan E.S. et al. Hydroponic system for growing sunflower plants for breeding purposes. *Oil Crops*. 2024;4(200);3-12. [in Russian] (Демури́н Я.Н., Перетягина Т.М., Чебанова Ю.В., Коннов Н.А., Широких А.А., Саркисян Е.С. и др. Гидропонная система выращивания растений подсолнечника для селекционных целей. *Масличные культуры*. 2024;4(200);3-12). DOI: 10.25230/2412-608X-2024-4-200-3-12
- Fernández-Moya V., Martínez-Force E., Garcés R. Temperature effect on a high stearic acid sunflower mutant. *Phytochemistry*. 2002;59(1);33-37. DOI: 10.1016/s0031-9422(01)00406-x
- GOST 31663-2012. Interstate standard. Vegetable oils and animal fats. Determination of methyl esters of fatty acids by gaz chromatography method. Moscow: Standartinform; 2019. [in Russian] (ГОСТ 31663-2012. Межгосударственный стандарт. Масла растительные и жиры животные. Определение методом газовой хроматографии массовой доли метиловых эфиров жирных кислот. Москва: Стандартинформ; 2019). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104486> [дата обращения: 30.11.2024].
- GOST 31665-2012. Interstate standard. Vegetable oils and animal fats. Preparation of methyl esters of fatty acids. Moscow: Standartinform; 2019. [in Russian] (ГОСТ 31665-2012. Межгосударственный стандарт. Масла растительные и жиры животные. Получение метиловых эфиров жирных кислот. Москва: Стандартинформ; 2019). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104357> [дата обращения: 30.11.2024].
- Guo S., Zhang Y., Shao Y., Zhao L., Zuo Y., Li S. et al. Transcriptome analysis reveals the potential molecular mechanism involved in fatty acids biosynthesis of Sunflower. *Research Square*. [preprint] 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4974760/v1
- Harris H.C., McWilliam J.R., Mason W.K. Influence of temperature on oil content and composition of sunflower seed. *Australian Journal of Agricultural Research*. 1978;29(6);1203-1212. DOI: 10.1071/AR9781203
- Ionova E.V., Likhovidova V.A., Lobunskaya I.A. Drought and hydrothermal humidity factor as one of the criteria to estimate its intensity degree (literature review). *Grain Economy of Russia*. 2019;(6):18-22. [in Russian] (Ионова Е.В., Лиховидова В.А., Лобунская И.А. Засуха и гидротермический коэффициент увлажнения как один из критериев оценки степени ее интенсивности (обзор литературы). *Зерновое хозяйство России*. 2019;(6):18-22). DOI: 10.25230/2412-608X-2019-6-6-18-22
- Ivanov P., Petakov D., Nikolova V., Pentchev E. Sunflower breeding for high palmitic acid content in the oil. In: *Proceedings of the 12th International Sunflower Conference, Novi Sad, Yugoslavia*. Paris: International Sunflower Association; 1988. p.463-465. Available from: https://www.isasunflower.org/fileadmin/documents/aProceedings/12thISC1988/Breeding/T1988BRE54_002.pdf [accessed Nov. 30, 2024].
- Ivanov S.L. The climatic theory of organic matter formation (Klimaticheskaya teoriya obrazovaniya organicheskikh veshchestv). Moscow: USSR Academy of Sciences; 1961. [in Russian] (Иванов С.Л. Климатическая теория образования органических веществ. Москва: АН СССР; 1961).
- Izquierdo N., Aguirrezábal L., Andrade F., Pereyra V. Night temperature affects fatty acid composition in sunflower oil depending on the hybrid and the phenological stage. *Field Crops Research*. 2002;77(2):115-126. DOI: 10.1016/S0378-4290(02)00060-6
- Izquierdo N.G., Aguirrezabal L.A.N. Genetic variability in the response of fatty acid composition to minimum night temperature during grain filling in sunflower. *Field Crops Research*. 2008;106(2):116-125. DOI: 10.1016/j.fcr.2007.10.016
- Lajara J.R., Diaz U., Quidiello R.D. Definitive influence of location and climatic conditions on the fatty acid composition of sunflower seed oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 1990;67(10):618-623. DOI: 10.1007/BF02540410
- Mancha M., Osorio J., Garcés R., Ruso J., Muñoz J., Fernandez-Martinez J.M. New sunflower mutants with altered seed fatty acid composition. *Progress in Lipid Research*. 1994;33(1-2):147-154. DOI:10.1016/0163-7827(94)90017-5
- Martínez-Force E., Álvarez-Ortega R., Cantisán S., Garcés R. Fatty acid composition in developing high saturated sunflower (*Helianthus annuus*) seeds: maturation changes and temperature effect. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1998;46(9):3577-3582. DOI: 10.1021/jf980276e
- Nagao A., Yamazaki M. Effect of temperature during maturation on fatty acid composition of sunflower seed. *Agricultural and Biological Chemistry*. 1984;48(2):553-555. DOI: 10.1080/00021369.1984.10866182
- Osorio J., Fernández-Martínez J.M., Mancha M., Garcés R. Mutant sunflowers with high concentration of saturated fatty acids in the oil. *Crop Science*. 1995;35(3):739-742. DOI: 10.2135/cropsci1995.0011183x003500030016x
- Rauf S. Breeding strategies for sunflower (*Helianthus annuus* L.) genetic improvement. In: J. Al-Khayri, S. Jain, D. Johnson (eds). In: *Advances in Plant Breeding Strategies: Industrial and Food Crops*. Cham: Springer; 2019. p.637-673. DOI: 10.1007/978-3-030-23265-8_16
- Rochester C.P., Silver J.G. Unsaturated fatty acid synthesis in sunflower (*Helianthus annuus* L.) seeds in response to night temperature. *Plant Cell Reports*. 1983;2(5):229-231. DOI: 10.1007/BF00269147
- Seiler G.J. Effect of hybrid, flowering date and environment on oil content and oil quality of wild sunflower seed. *Crop Science*. 1983;23;1063-1068.
- Soldatov K.I., Voskoboinik L.K., Kharchenko L.N. High-oleic sunflower variety Pervenets. *Oil Crops*. 1976;(3):3-7. [in Russian] (Солдатов К.И. Воскобойник Л.К., Харченко Л.Н. Высокоолеиновый сорт подсолнечника Первенец. *Масличные культуры*. 1976;(3):3-7).

Turhan H., Citak N., Pehlivanoglu H., Mengul Z. Effects of ecological and topographic conditions on oil content and fatty acid composition in sunflower. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2010;16(5);553-558.

USDA-IPAD. Sunflowerseed Explorer: [website]. Available from: <https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=2224000> [accessed Apr. 10, 2025].

Информация об авторах

Юлия Владимировна Чебанова, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В.С. Пустовойта, 350038 Россия, Краснодар, ул. им. Филатова, 17, aqvablue@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7421-4800>

Яков Николаевич Демурин, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В.С. Пустовойта, 350038 Россия, Краснодар, ул. им. Филатова, 17, genetic@vniimk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3903-020X>

Илья Владимирович Киров, доктор биологических наук, заведующий лабораторией, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии, 127550 Россия, Москва, Тимирязевская, 42, kirovez@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3885-3837>

Information about the authors

Yulia V. Chebanova, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, V.S. Pustovoit All-Russia Research Institute of Oil Crops, 17 Filatova St., Krasnodar 350038, Russia, aqvablue@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7421-4800>

Yakov N. Demurin, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, V.S. Pustovoit All-Russia Research Institute of Oil Crops, 17 Filatova St., Krasnodar 350038, Russia, genetic@vniimk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3903-020X>

Ilya V. Kirov, Dr. Sci. (Biology), Head of a Laboratory, All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, 42 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russia, kirovez@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3885-3837>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 19.09.2025; одобрена после рецензирования 15.11.2025; принята к публикации 10.02.2026.
The article was submitted on 19.09.2025; approved after reviewing on 15.11.2025; accepted for publication on 10.02.2026.