

Ольга Анатольевна Киселева^{1✉}, Елена Юрьевна Невоструева²,

Мария Алексеевна Полежаева³, Анастасия Олеговна Савина⁴

1,2,3,4Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр УрО РАН, Екатеринбург, Россия

¹kiselevaolga@inbox.ru

²lena.nevostrueva.74@mail.ru

³polezhaevam@mail.ru

⁴soven_444@mail.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ДНК-СКРИНИНГА КОЛЛЕКЦИИ ЗЕМЛЯНИКИ САДОВОЙ СВЕРДЛОВСКОЙ СЕЛЕКЦИОННОЙ СТАНЦИИ САДОВОДСТВА НА ПРИСУТСТВИЕ ГЕНОВ FaOMT, FaFAD1

Цель исследования – провести молекулярно-генетический скрининг образцов земляники садовой на предмет присутствия целевых функциональных аллелей генов, вовлеченных в формирование ароматического комплекса плодов земляники (гена FaOMT, который контролирует выработку мезифурана и отвечает за фруктово-карамельный аромат, и ген FaFAD1, который связан с синтезом γ-декалактона). Исследование проводили на базе научной коллекции живых растений Свердловской селекционной станции садоводства в 2024–2025 гг. Объекты исследования – 40 сортов и 60 гибридов, созданных методом межсортовой гибридизации в пределах вида *Fragaria × ananassa*. Оценку разнообразия генотипов по исследуемым генам проводили с использованием ПЦР и электрофоретического разделения продуктов амплификации в агарозном геле. Для идентификации ценных генотипов – источников моногенного признака наличия мезифурана в плодах использовали кодоминантный молекулярный маркер FaOMT-SI/NO, для идентификации доноров моногенного признака наличия γ-декалактона в плодах – маркер FaFAD1. В качестве положительного контроля для гена FaOMT послужили сорта Polka, Фестивальная, в качестве отрицательного – сорта Aprica, Pandora, для гена FaFAD1 положительным контролем служил сорт Salsa, отрицательным – сорта Karmen, Polka. Результатом выполненного исследования стало обнаружение функционального аллеля FaOMT в гомозиготном состоянии у сортов Акварель, Даренка, Десна, Дуэт, Гейзер, Италмас, Ярославна, Asia, Cardinal, Elsanta, Honeyoye, Salsa, Sonsation, Totem, а также у 28 отборных гибридов. Гетерозиготное сочетание аллелей гена FaOMT обнаружилось у 45 сортобразцов. Также выявлены сорта, у которых нет функционального аллеля FaOMT: Ассоль, Альфа, Дарунок вчителю, Aprica, Dukat, Pandora. Функциональное состояние аллеля гена FaFAD1 выявлено у 14 сортобразцов, в т. ч. у сортов: Акварель, Боровицкая, Даренка, Дарунок вчителю, Ольвия, Cardinal, Elsanta, Florence, Florida 90, Isaura, Salsa, Pandora.

Ключевые слова: *Fragaria × ananassa* Duch., генотип, маркер-ориентированная селекция, запах плодов земляники

Для цитирования: Киселева О.А., Невоструева Е.Ю., Полежаева М.А., и др. Результаты ДНК-скрининга коллекции земляники садовой Свердловской селекционной станции садоводства на присутствие генов FaOMT, FaFAD1 // Вестник КрасГАУ. 2025. № 11. С. 23–34. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-11-23-34.

Финансирование: исследование выполнено на базе уникальной научной установки коллекции живых растений открытого грунта «Генофонд плодовых, ягодных и декоративных культур на Среднем Урале» (Свердловская ССС ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН, г. Екатеринбург) в соответствии с темой государственного задания «Комплексная оценка генофонда ягодных культур с помощью молекулярно-генетических и биотехнологических методов в селекции на улучшение хозяйствственно ценных признаков на Урале» (FNUW-2024-0007).

Olga Anatolyevna Kiseleva¹✉, Elena Yuryevna Nevostrueva²,
Maria Alekseevna Polezhaeva³, Anastasia Olegovna Savina⁴

^{1,2,3,4}Ural Federal Agrarian Research Center, Ural Branch of the RAS, Ekaterinburg, Russia

¹kiselevaolga@inbox.ru

²lena.nevostrueva.74@mail.ru

³polezhaevam@mail.ru

⁴soven_444@mail.ru

RESULTS OF DNA SCREENING OF THE STRAWBERRY COLLECTION FROM THE SVERDLOVSK BREEDING STATION OF HORTICULTURE FOR THE PRESENCE OF FaOMT, FaFAD1 GENES

The objective of the study is to conduct a molecular genetic screening of garden strawberry samples for the presence of target functional alleles of genes involved in the formation of the strawberry fruit aroma complex (the FaOMT gene, which controls mesifuran production and is responsible for the fruity-caramel aroma, and the FaFAD1 gene, which is associated with the synthesis of γ -decalactone). The study was conducted using the scientific collection of living plants at the Sverdlovsk Horticultural Breeding Station in 2024–2025. The objects of the study were 40 varieties and 60 hybrids created by intervarietal hybridization within the *Fragaria × ananassa* species. Genotype diversity for the studied genes was assessed using PCR and electrophoretic separation of amplification products in agarose gel. To identify valuable genotypes – sources of the monogenic trait of the presence of mesifuran in fruits, the codominant molecular marker FaOMT-SI/NO was used, and to identify donors of the monogenic trait of the presence of γ -decalactone in fruits, the marker FaFAD1 was used. The Polka and Festivalnaya varieties served as positive controls for the FaOMT gene, while Aprica and Pandora served as negative controls. Salsa served as a positive control for the FaFAD1 gene, while Karmen and Polka served as negative controls. The study revealed the homozygous functional FaOMT allele in the following varieties: Akvarel, Darenka, Desna, Duet, Geyser, Italmas, Yaroslavna, Asia, Cardinal, Elsanta, Honeoye, Salsa, Sonsation, and Totem, as well as in 28 selected hybrids. Heterozygous combinations of FaOMT alleles were detected in 45 cultivars. Varieties lacking the functional FaOMT allele were also identified: Assol, Alfa, Darunok Vchitelyu, Aprica, Dukat, and Pandora. The functional state of the FaFAD1 gene allele was identified in 14 cultivar samples, including the following varieties: Aquarelle, Borovitskaya, Darenka, Darunok vchitelyu, Olvia, Cardinal, Elsanta, Florence, Florida 90, Isaura, Salsa, Pandora.

Keywords: *Fragaria × ananassa* Duch., genotype, marker-assisted selection, strawberry fruit aroma

For citation: Kiseleva OA, Nevostrueva EYu, Polezhaeva MA, et al. Results of DNA screening of the strawberry collection from the Sverdlovsk breeding station of horticulture for the presence of FaOMT, FaFAD1 genes. *Bulletin of KSAU*. 2025;(11):23-34. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-11-23-34.

Funding: the study carried out at the Unique Scientific Facility of the Open-Ground Live Plant Collection "Gene Pool of Fruit, Berry, and Ornamental Crops in the Middle Urals" (Sverdlovsk SRC of the UB of the RAS, Ekaterinburg) in accordance with the state contract "Comprehensive Assessment of the Gene Pool of Berry Crops Using Molecular Genetic and Biotechnological Methods in Breeding to Improve Economically Valuable Traits in the Urals" (FNUW-2024-0007).

Введение. Одним из главных потребительских свойств плодов земляники (*Fragaria*) является ее аромат. В селекционных программах этот признак учитывается при отборе перспективных форм [1, 2]. В формировании ароматического комплекса плодов земляники участвуют множество генов, некоторые из которых стали известны и изучаются в последнее время [3]. Например, ген FaOMT контролирует выработку 4-метокси-2,5-диметил3-фуранона (мезифурана) и отвечает за фруктово-карамельный аромат

[4, 5], ген FaFAD1 связан с синтезом γ -декалактона и отвечает за персикоподобные сладкие ноты [4, 6], ген FaNAAMT обуславливает синтез метилового эфира антраксиловой кислоты (метилатранилата) и отвечает за характерный земляничный запах [7].

Для идентификации ценных генотипов – источников этих моногенных признаков необходим молекулярно-генетический скрининг, который был проведен для многих крупных коллекций в России [3, 5, 8–11] и за рубежом [4, 12]. Аллель-

ное разнообразие перечисленных генов изучается не только для сортов земляники садовой, но для некоторых видовых земляник, клубнично-земляничных гибридов [3, 5, 8–12].

Ген FaFAD1 картирован в дистальном районе длинного плеча хромосомы III-2 генома *Fragaria × ananassa* Duch. [13], функциональный аллель гена проявляет себя как доминантный, его экспрессия в высокой степени коррелирует с выработкой γ-декалактона в плодах [14]. Геном FaOMT картирован в дистальном районе длинного плеча хромосомы VII-F.1. [12]. Кодоминантный молекулярный маркер FaOMT-SI/NO фланкирует район, содержащий инсерции или делеции в гене FaOMT и позволяет идентифицировать доминантный функциональный аллель в гомозиготном и гетерозиготном состоянии у образцов, способных к выработке мезифурана в плодах [4, 8, 14].

Цель исследования – провести молекулярно-генетический скрининг образцов земляники садовой на предмет присутствия целевых функциональных аллелей генов, вовлеченных в формирование ароматического комплекса плодов земляники.

Задачи: проведение ПЦР-тестов с использованием диагностического маркера, сцепленного с

доминантным аллелем гена синтеза γ-декалактона FaFAD1; ПЦР-теста с использованием диагностического маркера для определения у образцов сочетания аллелей гена синтеза мезифурана FaOMT; сравнительный анализ полученных данных с учетом известных из публикаций результатов ранее проведенных скринингов для сортов и родословных изученных гибридов.

Объекты и методы. Сбор образцов проводили дважды в течение вегетационных сезонов 2024 и 2025 гг. Все отобранные для ДНК-скрининга растения произрастают в коллекции земляники фонда живых растений открытого грунта Свердловской селекционной станции садоводства как часть уникальной научной установки «Генофонд плодовых, ягодных и декоративных культур на Среднем Урале» [15]. Данная коллекция земляники садовой – самая крупная в регионе [16], включающая 55 интродуцированных сортов земляники зарубежной и отечественной селекции и 65 сортообразцов селекции Свердловской селекционной станции садоводства. В исследовании использованы 40 сортов и 60 гибридов *F. × ananassa*, происхождение которых представлено в таблицах 1, 2.

Таблица 1

Сорта земляники садовой, использованные в исследовании
Analyzed cultivars of strawberry

Сорт	Происхождение	Страна происхождения
1	2	3
Aprica	Неизвестно	Италия
Asia	Maya × NF-101	Италия
Belrubi	Pocahontas × Redcoat	Франция
Cardinal	Earlibelle × Ark. 5063	США
Dukat	Koralowa 100 × Gorella	Польша
Elsanta	Gorella × Holiday	Нидерланды
Florence	(Tioga × (Red Gauntlet × (Wiltguard × Gorella)) × (Providence × self))	Великобритания
Florida 90	Missionary, свободное опыление	США
Honeoye	Vibrant × Holiday	США
Isaura	Неизвестно	Бельгия
Karmen	Georg Soltwedel × Sparkle	Чехия
Marmolada	Gorella × Nr 15	Италия
Pandora	(Von Humboldt × Redstar) × Merton Dawn	Великобритания
Polka	Induka × Sivetta	Нидерланды
Salsa	Chandler × Polka	Нидерланды
Sonsation	Неизвестно	Нидерланды
Stoplight	(Florida 90 × Ciclone) × Dunlap	США

Окончание табл. 1

1	2	3
Totem	Puget Beauty × Northwest	Канада
Акварель	Арника × Горноуктусская	Россия
Алтын	Соловушка × Marmolada	Россия
Альфа	Сюрприз Олимпиаде × Фестивальная ромашка	Россия
Амулет	Georg Soltwedel × Sparkle	Россия
Ассоль	Red Gauntlet, свободное опыление	Россия
Бова	Арника × Торпеда	Россия
Боровицкая	Надежда × Red Gauntlet	Россия
Гейзер	Арника, свободное опыление	Россия
Даренка	Русановка × Фестивальная	Россия
Дарунок вчителю	Десна x Redglow	Украина
Десна	Неслучнянка × Redcoat	Украина
Дивная	Фестивальная × Holiday	Россия
Дуэт	Талка, свободное опыление	Россия
Италмас	Фестивальная × Stoplight	Россия
Ольвия	Присвята × 277-3-16	Украина
Орлец	Stoplight × Торпеда	Россия
Оскорянка	Киянка x Запашна	Россия
Соловушка	Фестивальная ромашка × Сюрприз Олимпиаде	Россия
Фейерверк	I ₁ Senga sengana × I ₂ Redcoat	Россия
Фестивальная	Обильная × Premier	Россия
Форсаж	Соловушка × Totem	Россия
Ярославна	Дуэт × Десна	Россия

Таблица 2

Гибриды земляники садовой, использованные в исследовании
Analyzed hybrids of strawberry

Гибрид	Происхождение	Гибрид	Происхождение
1	2	3	4
1.1	Алтын × Isaura	2-07-22	Соловушка × 2-54-11
1.2	Алтын × Isaura	2-22	Гейзер × 2-45-10
1.3	Алтын × Isaura	2-43-10	Соловушка × Marmolada
1.4	Алтын × Isaura	2-45-10	Соловушка × Dukat
1.6	Алтын × Isaura	2-54-11	Амулет × Marmolada
1.7	Алтын × Isaura	2-74-17	Гейзер × Stoplight
1.8	Алтын × Isaura	2-87-19	Алтын × Salsa
1.9	Алтын × Isaura	2-90-19	Соловушка × Salsa
1.10	Алтын × Isaura	2-95-20	Форсаж × Ольвия
1.11	Алтын × Isaura	2-98-21	Дуэт × Carmen
1.12	Алтын × Isaura	2-99-22	Дуэт × Ольвия
1.13	Алтын × Isaura	3.1	2-43-10 × Isaura
1.14	Алтын × Isaura	3.11	2-43-10 × Isaura
1.15	Алтын × Isaura	3.12	2-43-10 × Isaura
1.16	Алтын × Isaura	3.2	2-43-10 × Isaura
1.17	Алтын × Isaura	3.3	2-43-10 × Isaura
1.18	Алтын × Isaura	3.4	2-43-10 × Isaura
1-01-22	2-43-10 × 2-54-11	3.5	2-43-10 × Isaura

Окончание табл. 2

1	2	3	4
1-05-22	2-45-10 × Cardinal	3.6	2-43-10 × Isaura
1-06-22	Форсаж × 2-43-10	3.8	2-43-10 × Isaura
1-07-22	Соловушка × 2-54-11	3.9	2-43-10 × Isaura
1-86-19	Италмас × Salsa	3-06-22	Форсаж × 2-43-10
1-95-20	Форсаж × Ольвия	3-22	3-45-10 × 2-43-10
1-98-21	Дуэт × Karmen	3-86-19	Италмас × Salsa
2.1	1-66-15 × Salsa	4-22	1-40-10 × 3-44-10
2.2	1-66-15 × Salsa	4-95-20	Форсаж × Ольвия
2.3	1-66-15 × Salsa	85-18	1-40-10 × Marmolada
2.4	1-66-15 × Salsa	89-19	Salsa × Алтын
2.5	1-66-15 × Salsa	92-19	Италмас × Cardinal
2-00-22	Соловушка × Belrubi	93-20	Бова × 2-54-11

Молекулярно-генетический анализ проводили в лаборатории молекулярной генетики плодовых и ягодных культур Свердловской селекционной станции садоводства – структурного подразделения УрФАНИЦ УрО РАН. Экстракцию ДНК проводили из листьев с помощью набора D-Plants на колонках для выделения ДНК из растений (ООО «Биолабмикс», РФ). Проверка качества выделения ДНК проведена с помощью микросателлитного маркера EMFv020 [17]. Для изучения аллельного состояния гена FaOMT использовали кодоминантный маркер FaOMT-SI/NO, гена FaFAD1 – маркер FaFAD1 [4]. В качестве положительного контроля для гена FaOMT послужили сорта Polka, Фестивальная, в качестве отрицательного – сорта Aprica, Pandora, для гена FaFAD1 положительным контролем служил сорт Salsa, отрицательным – сорт Karmen, Polka. Использованные для анализа праймеры были синтезированы в ООО «БиоМетка» (РФ).

Реакционные смеси для проведения ПЦР готовили на базе набора БиоМастер HS-Таq ПЦР-Color (2×), в состав которого входят: 100 мМ Трис-HCl, pH 8,5 (при 25 °C), 100 мМ KCl, 0,4 мМ каждого дезоксинуклеозидтрифосфата, 4 мМ MgCl₂, 0,06 ед. акт./мкл Таq ДНКполимеразы, 0,2 % Tween 20, стабилизаторы HS-Таq ДНК-полимеразы и красители (ООО «Биолабмикс», РФ). При проведении ПЦР с микросателлитными праймерами EMFv020 в объеме 10 мкл к 5 мкл реакционной смеси добавляли по 0,25 мкл прямого и обратного праймера, 1 мкл ДНК с концентрацией 10–100 нг/мкл, 3,5 мкл воды. При проведении ПЦР с праймерами маркера FaOMT-SI/NO в объеме 10 мкл к 5 мкл реакционной смеси добавляли по 0,25 мкл прямого и

обратного праймера, 1,5 мкл ДНК с концентрацией 10–100 нг/мкл, 3 мкл воды. При проведении ПЦР с праймерами маркера FaFAD1 в объеме 10 мкл к 5 мкл реакционной смеси добавляли по 0,25 мкл прямого и обратного праймера, 1 мкл ДНК с концентрацией 10–100 нг/мкл, 3,5 мкл воды.

Термоциклирование (ПЦР) проводили на приборе CFX96 Touch (Bio-Rad, USA) согласно ранее опубликованным протоколам [13, 14, 17] с небольшими модификациями. Маркер EMFv020: денатурация 5 мин – 95 °C, 35 циклов: 20 с – 95 °C, 30 с – 64 °C, 30 с – 72 °C; финальная элонгация 5 мин – 72 °C; целевой фрагмент 170 п.н. После подтверждения качества выделения ДНК из образцов с помощью микросателлитного маркера проводили реакцию амплификации для изучения аллельного разнообразия генотипов по генам FaOMT и FaFAD1. Маркер FaOMT-SI/NO: денатурация 5 мин – 95 °C, 35 циклов: 20 с – 95 °C, 20 с – 50 °C, 30 с – 72 °C; финальная элонгация 7 мин – 60 °C; целевые фрагменты 217 п.н. и 248 п.н. Маркер FaFAD1: денатурация 5 мин – 95 °C, 35 циклов: 20 с – 95 °C, 30 с – 55 °C, 45 с – 72 °C; финальная элонгация 7 мин – 72 °C; целевой фрагмент 140 п.н. Разделение амплифицированных фрагментов проводили в 3 % агарозном геле в присутствии этидиум бромида. Для определения длины фрагментов использовали маркер длии ДНК 50 п.н. – DNA Ladder 50 + bp (ЕвроГен, РФ).

Результаты и их обсуждение. Результаты ДНК-скрининга коллекции по генам FaOMT и FaFAD1 представлены в таблицах 3, 4. Из числа изученных нами образцов, согласно научным публикациям, ранее ДНК-скрининг по генам FaFAD1 и FaOMT был проведен для сортов Бо-

ровицкая, Дивная, Соловушка, Фестивальная, Фейерверк, Aprica, Asia, Dukat, Elsanta, Karmen, Marmolada, Pandora, Polka, Salsa [4, 8, 11, 12]. В отношении выбранных положительных и отрицательных контролей полученные нами данные полностью совпадают с литературными.

Маркер FaFAD1 не позволяет различать гомозиготные и гетерозиготные генотипы по признаку синтеза γ -декалактона в плодах, однако помогает найти продуцентов ценного соедине-

ния до плодоношения, поскольку наличие целевого фрагмента 140 п.н. говорит о наличии функционального доминантного аллеля [13]. Присутствие функционального аллеля гена FaFAD1 ранее было показано для сортов: Боровицкая [11], Pandora [4], Salsa [12], Elsanta [12], Фейерверк [11], отсутствие – для сортов Дивная [8], Соловушка [8], Фестивальная [8], Polka [12], Karmen [8, 12].

Таблица 3

Результаты скрининга гибридов на присутствие функциональных аллелей генов, отвечающих за запах плодов у сортов

Results of screening hybrids for the presence of fruit flavor volatile genes in strawberry hybrids

Сорт	FaOMT		FaFAD1 140 п.н.	Сорт	FaOMT		FaFAD1 140 п.н.
	217 п.н.	248 п.н.			217 п.н.	248 п.н.	
Aprica	1	0	0	Альфа	1	0	0
Asia	0	1	0	Амулет	1	1	0
Belrubi	1	1	0	Ассоль	1	0	0
Cardinal	0	1	1	Бова	1	1	0
Dukat	1	0	0	Боровицкая	1	1	1
Elsanta	0	1	1	Гейзер	0	1	0
Florence	1	1	1	Даренка	0	1	1
Florida 90	1	1	1	Дарунок вчителю	1	0	1
Honeoye	0	1	0	Десна	0	1	0
Karmen	1	1	0	Дивная	1	1	0
Isaura	1	1	1	Дуэт	0	1	0
Marmolada	1	1	0	Италмас	0	1	0
Pandora	1	0	1	Ольвия	1	1	1
Polka	0	1	0	Орлец	1	1	0
Salsa	0	1	1	Осокорянка	1	1	0
Sonsation	0	1	0	Соловушка	1	1	0
Stoplight	1	1	0	Фейерверк	1	1	0
Totem	0	1	0	Фестивальная	0	1	0
Акварель	0	1	1	Форсаж	1	1	0
Алтын	1	1	0	Ярославна	0	1	0

Здесь и далее: (1 – аллель есть; 0 – аллеля нет).

Маркер FaOMT-SI/NO позволяет различать гомозиготы и гетерозиготы по гену FaOMT на основании размера ампликонов 248 и 217 п.н., при этом функциональным является доминантный аллель с ампликоном 248 п.н. [3, 12]. Присутствие функционального аллеля гена FaOMT в гомозиготном состоянии ранее было показано для сортов: Elsanta [12], Дивная [8, 12], в гетерозиготном состоянии: Соловушка [8, 12], Фейерверк [12], Asia [12], Dukat [12], Marmolada [12], Polka [8, 12], Salsa [12], отсутствие: Pandora [4]. Отсутствие одновременно функциональных ал-

лелей генов FaFAD1 и FaOMT достоверно показано у сорта Aprica [12]. Таким образом, полученные нами данные хорошо согласуются с результатами ранее проведенных ДНК-скринингов. В отношении сортов Фестивальная, Karmen в литературе присутствуют противоречивые сведения, в каком именно состоянии находится функциональный аллель FaOMT, в гомозиготном [8] или гетерозиготном [12]. Для сорта Karmen нами получены данные в пользу гетерозиготного состояния аллеля FaOMT, для сорта Фестивальная – гомозиготного состояния алле-

ля того же гена (табл. 3). Сорта Акварель, Алтын, Бова, Гейзер, Даренка, Дуэт, Италмас, Орлец, Форсаж, Ярославна и гибриды селекции

Свердловской селекционной станции садоводства были проанализированы впервые.

Таблица 4

Результаты скрининга гибридов на присутствие функциональных аллелей генов, отвечающих за запах плодов у гибридов

Results of screening hybrids for the presence of fruit flavor volatile genes in strawberry hybrids

Гибрид	FaOMT		FaFAD1	Гибрид	FaOMT		FaFAD1
	217 п.н.	248 п.н.	500 п.н.		217 п.н.	248 п.н.	500 п.н.
1.1	1	0	0	2-07-22	1	1	0
1.2	1	0	0	2-22	0	1	0
1.3	0	1	0	2-43-10	0	1	0
1.4	0	1	0	2-45-10	1	1	0
1.6	1	0	0	2-54-11	1	0	0
1.7	0	1	1	2-74-17	1	1	0
1.8	1	1	0	2-87-19	0	1	0
1.9	1	1	0	2-90-19	0	1	0
1.10	1	1	0	2-95-20	0	1	0
1.11	1	1	0	2-98-21	0	1	0
1.12	1	1	0	2-99-22	1	1	0
1.13	1	1	0	3.1	1	1	0
1.14	1	1	0	3.2	0	1	0
1.15	0	1	0	3.3	1	1	0
1.16	1	1	0	3.4	0	1	0
1.17	1	1	0	3.5	0	1	0
1.18	1	0	0	3.6	0	1	0
1-01-22	1	1	0	3.8	1	1	0
1-05-22	1	1	0	3.9	0	1	0
1-06-22	0	1	0	3.11	0	1	0
1-07-22	1	1	0	3.12	1	1	0
1-86-19	1	1	0	3-06-22	0	1	0
1-95-20	1	1	0	3-22	1	1	1
1-98-21	0	1	0	3-86-19	0	1	0
2.1	1	1	0	4-22	1	1	0
2.2	0	1	0	4-95-20	0	1	1
2.3	0	1	0	85-18	1	1	0
2.4	0	1	0	89-19	0	1	0
2.5	0	1	0	92-19	0	1	0
2-00-22	1	1	0	93-20	0	1	0

Пример идентификации фрагментов в ходе ДНК-скрининга аллелей гена FaOMT приведен на рисунке 1. По результатам проведенных исследований 44 % образцов имели функциональный аллель гена FaOMT в гомозиготном состоянии, 45 % являлись гетерозиготными носителями. У сортов Ассоль, Альфа, Дарунок вчителю, Aprica, Dukat, Pandora нет функционального аллеля FaOMT. При скрещивании ге-

терозиготных по признаку сортов Алтын x Isaura в потомстве (гибриды 1.1–1.18) получили расщепление: 4/17 рецессивных гомозигот, 4/17 доминантных гомозигот, 9/17 гетерозигот. При скрещивании гетерозиготы Isaura и доминантной гомозиготы 2-43-10 в потомстве (гибриды 3.1–3.12) наблюдается расщепление 4/10 гетерозиготы, 6/10 доминантные гомозиготы.

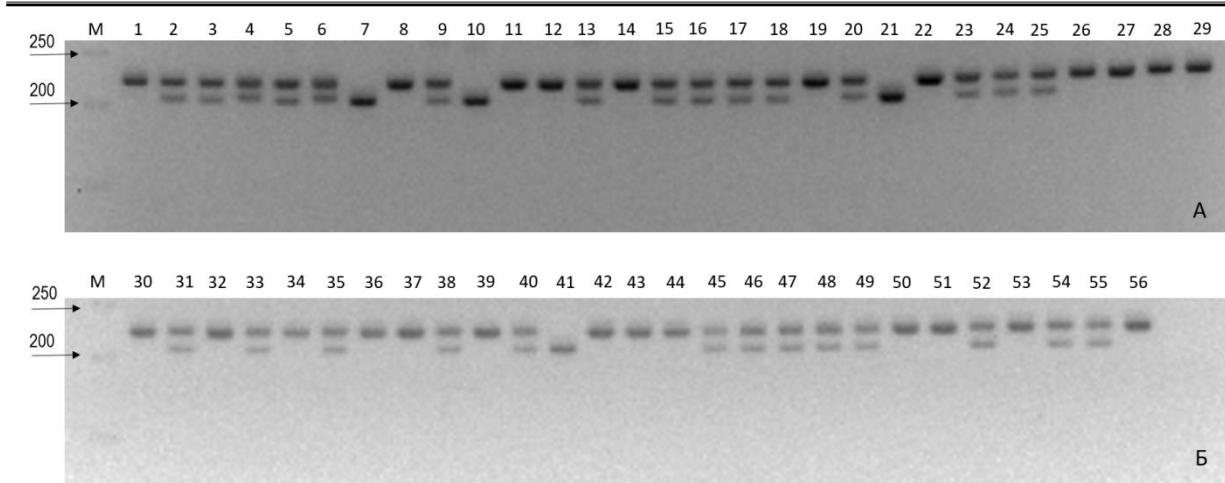


Рис. 1. Электрофоретический профиль сортов и гибридов *F. × ananassa* по маркеру FaOMT-SI/NO: М – маркер длины ДНК; А – электрофореграмма образцов 1–29; Б – электрофореграмма образцов 30–56; 1 – Акварель; 2 – Алтын; 3 – Амулет; 4 – Belrubi; 5 – Бова; 6 – Боровицкая; 7 – Дарунок вчителю; 8 – Десна; 9 – Дивная; 10 – Dukat; 11 – Дуэт; 12 – Гейзер; 13 – Isaura; 14 – Italmas; 15 – Marmolada; 16 – Ольвия; 17 – Орлец; 18 – Осокорянка; 19 – Salsa (положительный контроль); 20 – Stoplight; 21 – Pandora (отрицательный контроль); 22 – Totem; 23 – Florence; 24 – Florida 90; 25 – Форсаж; 26 – Honeoye; 27 – Elsanta; 28 – Фестивальная; 29 – Ярославна; 30 – 3-86-19; 31 – 2-99-22; 32 – 2-43-10; 33 – 2-45-10; 34 – 2-90-19; 35 – 2-07-22; 36 – 2-22; 37 – 2-87-19; 38 – 2-00-22; 39 – 2-95-20; 40 – 2-74-17; 41 – 2-54-11; 42 – 2-98-21; 43 – 89-19; 44 – 93-20; 45 – 85-18; 46 – 1-05-22; 47 – 1-95-20; 48 – 1-86-19; 49 – 1-07-22; 50 – 1-06-22; 51 – 1-98-21; 52 – 3-22; 53 – 3-06-22; 54 – 1-01-22; 55 – 4-22; 56 – 4-95-20

Electrophoretic profile of strawberry varieties and hybrids using the FaOMT-SI/NO marker:
М – DNA length marker; А – electropherogram of samples 1–29; Б – electropherogram of samples 30–56;

1 – Akvarel'; 2 – Altyn; 3 – Amulet; 4 – Belrubi; 5 – Bova; 6 – Borovickaya;
7 – Darunok vchitelyu; 8 – Desna; 9 – Divnaya; 10 – Dukat; 11 – Duet; 12 – Gejzer; 13 – Isaura;
14 – Italmas; 15 – Marmolada; 16 – Ol'viya; 17 – Orlec; 18 – Osokoryanka; 19 – Salsa (positive control);
20 – Stoplight; 21 – Pandora (negative control); 22 – Totem; 23 – Florence; 24 – Florida 90; 25 – Forsazh;
26 – Honeoye; 27 – Elsanta; 28 – Festivalnaya; 29 – YAroslavna; 30 – 3-86-19; 31 – 2-99-22; 32 – 2-43-10;
33 – 2-45-10; 34 – 2-90-19; 35 – 2-07-22; 36 – 2-22; 37 – 2-87-19; 38 – 2-00-22; 39 – 2-95-20; 40 – 2-74-17;
41 – 2-54-11; 42 – 2-98-21; 43 – 89-19; 44 – 93-20; 45 – 85-18; 46 – 1-05-22; 47 – 1-95-20; 48 – 1-86-19;
49 – 1-07-22; 50 – 1-06-22; 51 – 1-98-21; 52 – 3-22; 53 – 3-06-22; 54 – 1-01-22; 55 – 4-22; 56 – 4-95-20

Пример идентификации фрагментов в ходе ДНК-скрининга аллелей гена FaFAD1 приведен на рисунке 2. По результатам проведенных исследований 13 % образцов имели функциональный аллель гена FaFAD1.

На основании выполненных исследований можно проследить передачу целевых аллелей генов с учетом родословной. Например, в гибридной семье Соловушка x Marmolada получен сорт Алтын и перспективный гибрид 2-43-10. В потомстве отсутствует функциональный аллель гена FaFAD1, поскольку его не было у родителей. В то же время оба родителя гетерозиготны в отношении аллелей гена FaOMT, как и их потомок – сорт Алтын, а гибрид 2-43-10 получил 2 функциональных аллеля этого гена (по одному от каждого из

родителей), то есть является гомозиготным в отношении исследуемого аллеля и может служить источником ценного признака. Сорт Форсаж, который используется в селекционном процессе на Свердловской селекционной станции садоводства, является результатом скрещивания Соловушка x Totem. Один из родительских сортов (Totem) гомозиготен по функциональному аллелю гена FaOMT, а второй (Соловушка) – гетерозиготен, как и сорт Форсаж. Функциональный аллель гена FaFAD1 отсутствует у сорта Форсаж, поскольку его нет у родителей. От комбинации скрещивания, где один родитель гетерозиготен, а второй – гомозиготен по функциональному аллелю гена FaOMT (Форсаж x 2-43-10), получены перспективные гибриды 1-06-22 и 3-06-22, несущие

щие функциональный аллель гена FaOMT в гомозиготном состоянии. Таким образом, сортообразцы 1-06-22 и 3-06-22 могут служить источником ценного признака – фруктово-карамельного аромата плодов. Расщепление в потомстве можно наблюдать на примере гибридизации Форсаж × Ольвия, где источником доминантного функционального аллеля гена FaFAD1 является сорт Ольвия. В потомстве получены гибрид 1-95-20, повторяющий генотип родительского сорта Форсаж по исследуемым аллелям, и перспективный 4-95-20, несущий оба изучаемых функциональных аллеля генов FaOMT и FaFAD1. Сорт земляники садовой Ярославна, выведенный на Свердловской селекционной станции садоводства, полученный от скрещивания сортов Дуэт и Десна, как и родительские формы, гомозиготен по двум изученным генам (имеет функциональный аллель гена FaOMT и не имеет функционального аллеля гена FaFAD1). Гибрид 1.7 получил по одному функциональному аллелю гена FaOMT от гетерозиготных родительских форм

Алтын × Isaуra, а доминантный аллель FaFAD1 – от иностранного сорта Isaуra. Итак, соотнесение фактических результатов ДНК-скрининга не противоречит приведенным родословным изученных сортообразцов.

Наиболее перспективны для селекции по приятному выраженному запаху плодов генотипы, для которых подтверждено присутствие функциональных аллелей одновременно двух генов FaOMT, FaFAD1, особенно когда по гену FaOMT наблюдается доминантная гомозигота, например, как у сорта Salsa [12]. В ходе проведенного скрининга среди сортов селекции Свердловской селекционной станции садоводства найдено 4 ценных культивара: оригинальные сорта Акварель и Даренка, гибрид 1.7, 4-95-20. Перспективными для дальнейшего отбора и селекции также можно считать 28 из 60 гибридов, гомозиготных по доминантному аллелю гена FaOMT, способных к выработке мезифурана в плодах (см. табл. 4).

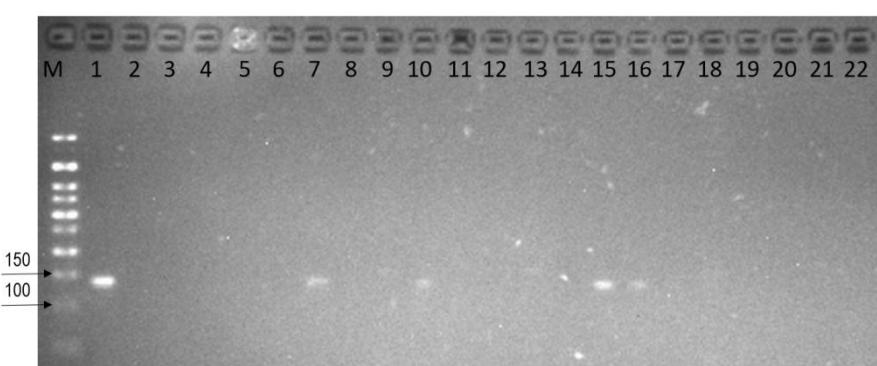


Рис. 2. Электрофоретический профиль сортов и гибридов *F. × ananassa* по маркеру FaFAD1:

M – маркер длины ДНК; 1 – Акварель, 2 – 2-54-11; 3 – 2-74-17; 4 – 85-18; 5 – Asia; 6 – Десна; 7 – Isaуra; 8 – Karmen; 9 – Polka (отрицательный контроль); 10 – Salsa (положительный контроль); 11 – Sonsation; 12 – Алтын; 13 – Ассоль; 14 – Бова; 15 – Боровицкая; 16 – Даренка; 17 – Elsanta; 18 – Дуэт; 19 – Италмас; 20 – Альфа; 21 – Соловушка; 22 – Фейерверк

Electrophoretic profile of strawberry varieties and hybrids using the FaFAD1 marker:

M – DNA length marker; 1 – Akvarel', 2 – 2-54-11; 3 – 2-74-17; 4 – 85-18; 5 – Asia; 6 – Desna; 7 – Isaуra; 8 – Karmen; 9 – Polka (negative control); 10 – Salsa (positive control); 11 – Sonsation; 12 – Altyn; 13 – Assol'; 14 – Bova; 15 – Borovickaya; 16 – Darenka; 17 – Elsanta; 18 – Duet; 19 – Italmas; 20 – Al'fa; 21 – Solovushka; 22 – Fejerverk

Заключение. Проведенное молекулярно-генетическое исследование 100 коллекционных образцов впервые позволило оценить генофонд коллекции земляники садовой Свердловской селекционной станции садоводства на наличие источников двух ценных признаков у плодов – выработку ароматических соединений мезифурана и γ -декалактона, которые кодируются ге-

нами FaOMT и FaFAD1 соответственно. Важным выводом стало обнаружение гомозиготного состояния функционального аллеля FaOMT у сортов уральской селекции Акварель, Даренка, Дуэт, Гейзер, Италмас, Ярославна, а также у 28 отборных гибридов. Гетерозиготное сочетание аллелей гена FaOMT обнаружилось у 45 сортообразцов, в том числе впервые для 3 ураль-

ских сортов (Алтын, Бова, Форсаж) и 27 гибридов. Функциональное состояние аллеля гена FaFAD1 выявлено всего у 14 сортообразцов: Акварель, Боровицкая, Даренка, Дарунок вчителю, Ольвия, Cardinal, Elsanta, Florence, Florida 90, Isaura, Salsa, Pandora и гибрид 1.7, 4-95-20. На основании проведенного анализа можно сделать вывод о ценности коллекции, в которой наблюдается большое разнообразие по сочетанию аллелей двух целевых генов.

Практическая значимость работы заключается в том, что она позволила проследить наследование целевых аллелей генов в отдельных гибридных семьях и отобрать наиболее перспективные для селекции на качество плодов гено-

типы (Акварель, Даренка, гибрид 1.7, 4-95-20), которые совмещают гомозиготное состояние активной аллельной формы гена FaOMT с функциональным аллелем гена FaFAD1. Перечисленные сортообразцы могут служить источниками сразу двух ценных признаков аромата плодов (одновременное содержание мезифурана и γ -декалактона). Вовлечение этих ценных форм в гибридизацию позволит ускорить создание большего количества уральских сортов земляники с улучшенным запахом плодов. Результаты проведенного ДНК-скрининга будут учитываться при проведении дальнейшей гибридизации и комплексной оценке культиваров в ходе селекционных программ.

Список источников

1. Bianchi G., Lucchi P., Maltoni M.L., et al. Analysis of aroma compounds in new strawberry advanced genotypes // Acta Hortic. 2017. Vol. 1156. P. 673–678. DOI: 10.17660/ActaHortic.
2. Mezzetti B., Giampieri F., Yun-tao Zh., et al. Status of strawberry breeding programs and cultivation systems in Europe and the rest of the world // Journal of Berry Research. 2018. № 8 (3). P. 205–221. DOI: 10.3233/jbr-180314.
3. Лыжин А.С., Лукьянчук И.В. Молекулярный скрининг локусов FaOMT, FaFAD1 и FaNAAMT ароматического комплекса плодов у перспективных отборных форм земляники садовой // Плодоводство и ягодоводство России. 2024. Т. 78. С.14–20. DOI: 10.31676/2073-4948-2024-78-14-20.
4. Cruz-Rus E., Sesmero R., Ángel-Pérez J.A., et al. Validation of a PCR test to predict the presence of flavor volatiles mesifurane and γ -decalactone in fruits of cultivated strawberry (*Fragaria × ananassa*) // Molecular breeding. 2017. Vol. 37, N 10. P. 131. DOI: 10.1007/s11032-017-0732-7.
5. Лыжин А.С., Лукьянчук И.В. Оценка аллельного состояния гена FaOMT у селекционных форм земляники межсортового происхождения // Плодоводство и виноградорство юга России. 2023. Т. 84 (6). С. 15–23. DOI: 10.30679/2219-5335-2023-6-84-15-23.
6. Oh Y., Barbey C.R., Chandra S., et al. Genomic characterization of the fruity aroma gene, FaFAD1, reveals a gene dosage effect on γ -decalactone production in strawberry (*Fragaria × ananassa*) // Frontiers in Plant Science. 2021. Vol. 12. P. 639345. DOI: 10.3389/fpls.2021.639345.
7. Pillet J., Chambers A.H., Barbey C., et al. Identification of a methyltransferase catalyzing the final step of methyl anthranilate synthesis in cultivated strawberry // BMC Plant Biology. 2017. N 17 (1). P. 1–12. DOI: 10.1186/s12870-017-1088-1.
8. Лыжин А.С., Лукьянчук И.В., Жбанова Е.В. Полиморфизм сортов и дикорастущих видов земляники генетической коллекции ФНЦ им. И.В. Мичурина по генам аромата плодов FaOMT и FaFAD1 // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2020. Т. 24, № 1. С. 5–11. DOI: 10.18699/VJ20.588.
9. Лыжин А.С., Лукьянчук И.В. Анализ перспективных гибридных форм земляники по генам FaOMT и FaFAD1 аромата плодов // Таврический вестник аграрной науки. 2021. № 3 (27). С. 117–124. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-3-27-117-124.
10. Лыжин А.С., Лукьянчук И.В. Аллельный полиморфизм отборных форм земляники селекции ФНЦ им. И.В. Мичурина по гену FaOMT ароматического комплекса плодов. В сб.: XX Международная научная конференция «Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК». Брянск, 2023. С. 130–135. EDN: QSDETI.
11. Лыжин А.С. Аллельный полиморфизм генотипов земляники по гену FaFAD1 ароматического комплекса плодов // Научные труды СК ФНЦ СВВ. 2020. Т. 29. С. 160–164. DOI: 10.30679/2587-9847-2020-29-160-164.

-
12. Кулик Е.М., Камедъко Т.Н., Пугачев Р.М. Молекулярно-генетический анализ сортов земляники садовой по генам аромата плодов FaOMT и FaFAD1 // Молекулярная и прикладная генетика. 2024. Т. 36. С. 65–70.
 13. Sánchez-Sevilla J.F., Cruz-Rus E., Valpuesta V., et al. Deciphering gamma-decalactone biosynthesis in strawberry fruit using a combination of genetic mapping, RNA-Seq and eQTL analyses // BMC genomics. 2014. Vol. 15 (1). P. 218. DOI: 10.1186/1471-2164-15-218.
 14. Zorrilla-Fontanesi Y., Rambla J-L., Cabeza A., et al. Genetic analysis of strawberry fruit aroma and identification of O-methyltransferase FaOMT as the locus controlling natural variation in mesifurane content // Plant physiology. 2012. Vol. 159 (2). P. 851–870. DOI: 10.1104/pp.111.188318.
 15. Слепнева Т.Н., Чеботок Е.М. Сохранение и пополнение генетических ресурсов плодовых, ягодных и декоративных культур путем создания уникальной научной установки коллекции живых растений открытого грунта // Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада. 2017. № 144 (Ч. 1). С. 54–58. EDN: ZEKQNB.
 16. Невоструева Е.Ю. Изучение отборных сеянцев земляники в условиях Среднего Урала // Садоводство и виноградорство. 2015. № 6. С. 24–27. DOI: 10.31676/0235-2591-2015-6-24-27. EDN: VCNRVZ.
 17. Hadonou A.M., Sargent D.J., Wilson F., et al. Development of microsatellite markers in *Fragaria*, their use in genetic diversity analysis, and their potential for genetic linkage mapping // Genome. 2004. Vol. 47. P. 429–438. DOI: 10.1139/g03-142.

References

1. Bianchi G, Lucchi P, Maltoni ML, et al. Analysis of aroma compounds in new strawberry advanced genotypes. *Acta Hortic.* 2017;1156:673-678. DOI: 10.17660/ActaHortic.
2. Mezzetti B, Giampieri F, Yun-tao Zh, et al. Status of strawberry breeding programs and cultivation systems in Europe and the rest of the world. *Journal of Berry Research.* 2018;8(3):205-221. DOI: 10.3233/jbr-180314.
3. Lyzhin AS, Luk'yanchuk IV. Molecular screening of FaOMT, FaFAD1 and FaNAAMT loci in the aroma complex of promising strawberry forms. *Plodovodstvo i yagodovodstvo Rossii.* 2024;78:14-20. (In Russ.). DOI: 10.31676/2073-4948-2024-78-14-20.
4. Cruz-Rus E, Sesmero R, Ángel-Pérez JA, et al. Validation of a PCR test to predict the presence of flavor volatiles mesifurane and γ -decalactone in fruits of cultivated strawberry (*Fragaria* \times *ananassa*). *Molecular breeding.* 2017;37(10):131. DOI: 10.1007/s11032-017-0732-7.
5. Lyzhin AS, Luk'yanchuk IV. Assessment of the allelic state of the FaOMT gene in strawberry breeding forms of intervarietal origin. *Plodovodstvo i vinogradarstvo Yuga Rossii.* 2023;84(6):15-23. (In Russ.). DOI: 10.30679/2219-5335-2023-6-84-15-23.
6. Oh Y, Barbey CR, Chandra S, et al. Genomic characterization of the fruity aroma gene, FaFAD1, reveals a gene dosage effect on γ -decalactone production in strawberry (*Fragaria* \times *ananassa*). *Frontiers in Plant Science.* 2021;12:639345. DOI: 10.3389/fpls.2021.639345.
7. Pillet J, Chambers AH, Barbey C, et al. Identification of a methyltransferase catalyzing the final step of methyl anthranilate synthesis in cultivated strawberry. *BMC Plant Biology.* 2017;17(1):1-12. DOI: 10.1186/s12870-017-1088-1.
8. Lyzhin AS, Luk'yanchuk IV, Zhbanova EV. Polymorphism of the FaOMT and FaFAD1 genes for fruit flavor volatiles in strawberry varieties and wild species from the genetic collection of the Michurin FRC. *Journal of Genetics and Breeding.* 2020;24(1):5-11. (In Russ.). DOI: 10.18699/VJ20.588.
9. Lyzhin AS, Luk'yanchuk IV. Analysis of promising strawberry hybrid forms by FaOMT and FaFAD1 fruit aroma genes. *Taurida herald of the agrarian sciences.* 2021;3(27):117-124. (In Russ.). DOI: 10.33952/2542-0720-2021-3-27-117-124.
10. Lyzhin AS, Luk'yanchuk IV. Allelic polymorphism of strawberry selected forms created in the I.V. Michurin FSC by the FaOMTS fruit aroma complex gene. *Agroekologicheskie aspekty ustojchivogo razvitiya APK: Conference proceedings and proceedings of the XX international scientific conference.* Bryansk; 2023. P. 130-135. (In Russ.). EDN: QSDETI.

11. Lyzhin AS. Allelic polymorphism of strawberry genotypes for the FaFAD1 gene of the reinforcing complex of fruits. *Nauchnye trudy Severo-Kavkazskogo federal'nogo nauchnogo centra sadovodstva, vinogradarstva, vinodeliya*. 2020;29:160-164. (In Russ.). DOI: 10.30679/2587-9847-2020-29-160-164.
12. Kulik EM, Kamedzko TN, Pugachev RM. Molecular genetic analysis of garden strawberry varieties by FaOMT and FaFAD1 fruit aroma genes. *Molekulyarnaya i prikladnaya genetika*. 2024;36:65-70. (In Russ.).
13. Sánchez-Sevilla JF, Cruz-Rus E, Valpuesta V, et al. Deciphering gamma-decalactone biosynthesis in strawberry fruit using a combination of genetic mapping, RNA-Seq and eQTL analyses. *BMC genomics*. 2014;15(1):218. DOI: 10.1186/1471-2164-15-218.
14. Zorrilla-Fontanesi Y, Rambla J-L, Cabeza A, et al. Genetic analysis of strawberry fruit aroma and identification of O-methyltransferase FaOMT as the locus controlling natural variation in mesifurane content. *Plant physiology*. 2012;159(2):851-870. DOI: 10.1104/pp.111.188318.
15. Slepneva TN, CHebotok EM. Maintenance and replenishment of genetic resources of fruit, berry and ornamental crops through the establishment of unique scientific installations of the collection of living plants of open ground. *Woks of the State Nikit. Botan. Gard.* 2017;144(I):54-58. (In Russ.). EDN: ZEKQNB.
16. Nevostrueva EYu. The study of selected strawberry seedlings in conditions of the Middle Urals. *Horticulture and viticulture*. 2015;(6):24-27. (In Russ.). DOI: 10.31676/0235-2591-2015-6-24-27. EDN: VCNRVZ.
17. Hadonou AM, Sargent DJ, Wilson F, et al. Development of microsatellite markers in *Fragaria*, their use in genetic diversity analysis, and their potential for genetic linkage mapping. *Genome*. 2004;47:429-438. DOI: 10.1139/g03-142.

Статья принята к публикации 04.09.2025 / The article accepted for publication 04.09.2025.

Информация об авторах:

Ольга Анатольевна Киселева, старший научный сотрудник Свердловской селекционной станции садоводства, кандидат биологических наук

Елена Юрьевна Невоструева, старший научный сотрудник Свердловской селекционной станции садоводства, кандидат сельскохозяйственных наук

Мария Алексеевна Полежаева, старший научный сотрудник Свердловской селекционной станции садоводства, кандидат биологических наук

Анастасия Олеговна Савина, младший научный сотрудник Свердловской селекционной станции садоводства

Information about the authors:

Olga Anatolyevna Kiseleva, Senior Researcher at the Sverdlovsk Horticultural Selection Station, Candidate of Biological Sciences

Elena Yuryevna Nevostroeva, Senior Researcher at the Sverdlovsk Horticultural Selection Station, Candidate of Agricultural Sciences

Maria Alekseevna Polezhaeva, Senior Researcher at the Sverdlovsk Horticultural Selection Station, Candidate of Biological Sciences

Anastasia Olegovna Savina, Junior researcher at the Sverdlovsk Horticultural Selection Station