

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-6-1-1360

EDN: FPDTJC

УДК 634.124:634.11:577.114



Научная статья

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОСТАВА И СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕВОДОВ В ПЛОДАХ *M. BACCATA* (L.) BORKH. И ЕЕ ГИБРИДНЫХ СОРТОВ С *M. DOMESTICA* BORKH.

*Е.Г. Рудиковская, З.О. Ставицкая, Л.В. Дударева,
Н.В. Семёнова, Н.Б. Катышева, А.В. Рудиковский*

Аннотация

Обоснование. Сведения о составе и содержании углеводов в плодах широко распространенных в холодном климате гибридных сортов *Malus baccata* (L.) Borkh. и *Malus domestica* Borkh. представляют интерес как с фундаментальной точки зрения - для оценки наследования этих признаков в поколениях гибридов, так и с практической - в качестве маркера для отбора гибридов с улучшенными вкусовыми качествами. Однако подробный анализ содержания таких компонентов в плодах гибридов слабо изучен.

Цель. Сравнительный анализ углеводного состава в тканях плодов *M. baccata* (L.) Borkh. и её гибридных сортов с *M. domestica* Borkh.

Материалы и методы. Исследование количественного и качественного состава пектинов проводили методами УФ- и ИК спектроскопии; простых углеводов – методом ВЭЖХ.

Результаты. Показано, что в тканях плодов гибридных генотипов содержание фруктозы составляло от 36% до 70% от суммы сахаров. В плодах *M. baccata* доминирующими растворимыми углеводами были транспортные: сорбитол и сахароза. В процессе гибридизации содержание сорбитола в плодах заметно снижалось (минимум у яблони домашней). У большинства генотипов содержание протопектина было выше, чем водорастворимой пектиновой фракции. Наиболее высокое общее содержание пектинов было обнаружено в плодах *M. baccata*. Этерификация обеих фракций пектина в тканях всех исследованных генотипов была высокой - выше 50%. Размер клеток плодов гибридов был небольшим по сравнению *M. domestica*, и в среднем составлял 17-25 мкм. Размер клеток не коррелировал с размером плодов.

Заключение. Вероятно, высокое содержание пектинов, степени их этерификации и размер клеток является одной из причин формирования устойчивости исследованных генотипов к патогенам.

Ключевые слова: *Malus baccata*; гибридные сорта; углеводы; пектины

Для цитирования. Рудиковская, Е. Г., Ставицкая, З. О., Дударева, Л. В., Семёнова, Н. В., Катышева, Н. Б., & Рудиковский, А. В. (2025). Сравнительный анализ состава и содержания углеводов в плодах *M. baccata* (L.) Borkh. и ее гибридных сортов с *M. domestica* Borkh. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(6-1), 94-114. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-6-1-1360>

Original article

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE COMPOSITION AND CARBOHYDRATE CONTENT IN THE FRUITS OF *M. BACCATA* (L.) BORKH. AND ITS HYBRID VARIETIES WITH *M. DOMESTICA* BORKH.

*E.G. Rudikovskaya, Z.O. Stavitskaya, L.V. Dudareva,
N.V. Semenova, N.B. Katysheva, A.V. Rudikovskii*

Abstract

Background. Research studies of the composition and content of carbohydrates in fruits of the hybrid varieties *Malus baccata* (L.) Borkh. and *Malus domestica* Borkh., which are widespread in cold climates, are important both from a fundamental point of view - for assessing the inheritance of these traits in hybrid generations, and from a practical point of view - as a marker for selecting hybrids with improved taste qualities. However, a detailed analysis of the carbohydrate content of these hybrids is poorly studied.

Purpose. Comparative analysis of the carbohydrate composition in the fruit tissues of *M. baccata* (L.) Borkh. and its hybrid varieties with *M. domestica* Borkh.

Materials and methods. The study of the quantitative and qualitative composition of pectins was carried out using UV and IR spectroscopy; simple carbohydrates - using HPLC.

Results. It was shown that in the hybrid genotypes fruit tissues the fructose content varied from 36% to 70% of the total sugars. In the tissues of *M. baccata* fruits the dominant soluble carbohydrates were sorbitol and sucrose. As a result of hybridization, the sorbitol content in fruits decreased significantly (minimum

content was found in *M. domestica* fruits). In most genotypes, the protopectin content was higher than content of water-soluble pectin fractions. The highest total pectin content was found in *M. baccata* fruits. The esterification of both pectin fractions in the tissues of all genotypes was high—above 50%. The cell size of the hybrids fruits was small compared to *M. domestica* cell size, varied from 17 to 25 µm. For all the types, cell size did not correlate with fruit size.

Conclusion. It is possible that combination of high pectin content, esterification degree and smaller cell size is one of the reasons for the resistance of the studied genotypes to pathogens.

Keywords: *Malus baccata*; hybrid varieties; carbohydrates; pectins

For citation. Rudikovskaya, E. G., Stavitskaya, Z. O., Dudareva, L. V., Semenova, N. V., Katysheva, N. B., & Rudikovskii, A. V. (2025). Comparative analysis of the composition and carbohydrate content in the fruits of *M. baccata* (L.) Borkh. and its hybrid varieties with *M. domestica* Borkh. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(6-1), 94-114. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-6-1-1360>

Введение

Яблоня домашняя (*Malus domestica* Borkh.) является одной из самых распространенных садовых культур. Высокий адаптивный потенциал и экологическая пластичность позволяют выращивать её практически по всему миру. Длительный селекционный процесс в отношении яблони позволил радикально улучшить исходный дикий вид *Malus sieversii* (Ledeb.) M. Roem. в отношении вкуса плодов, увеличения их размеров и урожайности. В связи с изменением климата сельскохозяйственных регионов, увеличением населения Земли, появлением новых биотипов фитопатогенов, приходится осваивать новые сельскохозяйственные территории, поэтому селекция плодовых культур продолжает стремительно развиваться. Помимо классического селекционного отбора, появляются новые генетические инструменты улучшения сортов, такие как, например, CRISPR, маркерная селекция.

В селекционных работах дикие виды яблони продолжают оставаться ценным биологическим ресурсом для использования в качестве источника генов устойчивости к биотическим и абиотическим стрессорам. Одним из перспективных в этом отношении видов является яблоня сибирская (*Malus baccata* (L.) Borkh.). Природные ареалы её обитания находятся в Восточной Сибири, Монголии и Северном Китае. Под давлением факторов внешней среды (зимние температуры до -50°C , короткий вегетационный период, суточные перепады температур) произошел естественный

отбор растений, обладающих высокой зимостойкостью, скороплодностью, устойчивостью к некоторым грибковым заболеваниям (парша) и т.д. [2; 3]. В процессе селекции, генный материал *M. baccata* был введен в *M. domestica*, что позволило адаптировать полученные гибриды к условиям резко континентального климата.

В настоящее время существует большое количество гибридных сортов (F1, F2, F3 и т.д.) яблони сибирской с яблоней домашней. Несмотря на то, что такие растения широко распространены в Сибири, за пределами России они известны мало. Следует отметить, что, помимо ценных сельскохозяйственных качеств (уникальной зимостойкости, скороплодности и устойчивости к ряду фитопатогенов), они обычно наследуют от яблони сибирской характерный, «сибирский» вкус плодов.

Как известно, вкус плодов, и яблок в том числе, определяется количеством и сочетанием различных типов углеводов. Например, в тканях плодов *M. domestica* основными сахарами являются фруктоза, глюкоза, сахароза. Необходимо отметить, что разные виды и сорта яблок, а также одни и те же сорта, выросшие в разных экологических условиях, могут отличаться по качественному и количественному составу углеводов, а значит и по вкусу. Помимо растворимых углеводов плоды яблони в большом количестве содержат пектиновые вещества, влияющие на текстуру плодов. Пектины представляют собой сложные структурные полимеры, участвующие в формировании клеточной стенки растений и играющие важную роль в процессах роста и растяжения клеток. В зависимости от степени полимеризации и других параметров, пектиновые вещества в клетке могут быть представлены в виде различных фракций, например, в виде нерастворимого протопектина, пектиновой кислоты и некоторых других. Структура, количественный и химический состав пектиновых веществ различается как у разных видов растений, так и у разных органов одного растения. Такие их свойства как различная степень этерификации, молекулярная масса, содержание ацетильных групп позволяет использовать пектины в качестве гелеобразователя, загустителя и стабилизатора в производстве кондитерских изделий, джемов, соков. Эти свойства также обуславливают фармакологическую активность пектинов, поэтому они активно применяются в фармацевтической промышленности в качестве сорбентов, для капсулирования лекарств и т.д. Информация о составе и содержании углеводов в плодах яблони сибирской и её гибридных сортов с яблоней домашней может быть полезной как с фундаментальной точки зрения - для оценки наследования этих признаков в поколениях гибридов, так и с

практической - в качестве маркера для отбора гибридов с улучшенными вкусовыми качествами.

Представленные в литературе сведения об углеводном составе тканей плодов рода *Malus* касаются, в основном, представителей вида *яблоня домашняя*. Есть ряд исследований, посвященных углеводному составу диких представителей рода, произрастающих на территории Китая, Индии, стран Центральной Азии. Однако информации об изучении биохимического состава сортов, принадлежащих к гибридам яблони сибирской и крупноплодных представителей яблони домашней крайне мало.

Цель. Сравнительный анализ углеводного состава (растворимых сахаров и пектинов) в тканях плодов *M. baccata* (L.) Borkh. и её гибридных сортов с *M. domestica* Borkh.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования были использованы плоды *M. baccata*, гибридных сортов яблони сибирской - Алтайское румяное, Живинка, Красноярское зимнее, Красноярской сладкое, Пепинчик красноярский, Неженка, Пальметта, Подарок БАМу, Ранетка пурпуровая, Добрыня, Сибирский сувенир, представители *M. domestica* - Чудное, Раннее Болоняева, выращенных на территории Сибирского института физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской Академии наук (55°42'27" N 37°31'38" E). Плоды для анализа отбирались на стадии биологической зрелости, в течение 4 лет - 2018, 2020, 2021 и 2022 годах.

Выделение и анализ растворимых сахаров

Навеску растительных тканей массой 0,2-0,3 г фиксировали в жидком азоте и гомогенизировали в 10 мл 80%-ного этанола. Раствор количественно переносили в центрифужные пробирки, озвучивали в течение 10 минут при температуре 15°C в ультразвуковой ванне (Сапфир, Россия) и центрифугировали (центрифуга Allegra 64R, Beckman Coulter Life Sciences, США) в течение 10 минут при температуре 15°C, 8000 об/мин. Надосадочную жидкость переливали в колбы с круглым дном и выпаривали досуха на роторном испарителе при температуре 55°C. Затем объём пробы доводили до 1 мл деионизированной водой и образцы очищали методом твердофазной экстракции на концентрирующих картриджах Диапак-Амин. Предварительно картриджи промывали последовательно 5 мл ацетонитрила и 5 мл деионизированной воды. После измерения объёма очищенного раствора аликвоту в 200

мкл переносили в эппендорф и смешивали с 600 мкл ацетонитрила (Криохром, Россия, сорт 0).

Комплекс растворимых сахаров исследовали методом ВЭЖХ на приборе Shimadzu LC-10 ATvp (Япония), колонка SUPELCOSIL LC-NH₂, 5 мкм, размеры колонки: 25 см × 4,6 мм (Merk, Германия). Неподвижной фазой была модифицированная фаза NH₂, в качестве подвижной фазы использовали 75% ацетонитрил в деионизированной воде. Режим элюирования- изократический, скорость потока элюента составляла 1 мл/мин при t=25°C. Соединения идентифицировали с использованием времени удерживания стандартных образцов: сахарозы, фруктозы, сорбита, галактозы, глюкозы («НеваРеактив», Россия), а также методом добавок.

Выделение пектиновых фракций

Образец растительного сырья (5 г) гомогенизировали с добавлением 25 мл 96%-ного этанола, нагретого до 85°C, затем озвучивали в течение 10 минут в ультразвуковой ванне (Сапфир, Россия). Полученный раствор нагревали в течение 20 минут на водяной бане с воздушным холодильником. Далее центрифугировали (центрифуга Allegra 64R, Beckman Coulter Life Sciences, США) в течение 10 минут при 8000 об/мин, удаляли надосадочную жидкость. К полученному осадку добавляли 25 мл деионизированной воды, нагретой до 45°C, затем повторно нагревали в течение 1 часа на водяной бане с воздушным холодильником и снова центрифугировали в течение 10 минут при 8000 оборотах в минуту. Супернатант количественно переносили в мерные пробирки, измеряя объём полученной водорастворимой фракции пектина.

Для получения фракции протопектина оставшийся осадок смешивали с 20 мл 0,3 Н соляной кислоты, нагревали в течение 30 минут на кипящей водяной бане с воздушным холодильником и центрифугировали в течение 10 минут при скорости 8000 об/мин. Супернатант сливали в мерную колбу. Оставшийся осадок промывали горячей водой, измеряли получившийся объём и смешивали с раствором 1% лимоннокислого аммония в соотношении 1:1, а затем снова нагревали на водяной бане в течение 30 минут и центрифугировали. Супернатант приливали к предыдущему экстракту и измеряли объём.

Количественное определение пектиновых веществ

Содержание пектиновых веществ определяли карбазольным методом [21]. Перед этим деметоксилирование проводили следующим способом: 10 мл пектинового экстракта смешивали с 10 мл 0,05 Н раствора NaOH и оставляли при комнатной температуре на 30 минут. После этого к раствору добавляли 10 мл 0,05 Н HCl.

Из каждого образца по 3 мл экстракта переносили в стеклянную пробирку, куда по капле добавляли 3 мл 0,25%-ного раствора $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ в концентрированной H_2SO_4 . Пробирки тщательно встряхивали и охлаждали на льду. Пробирки с образцами помещали на кипящую водяную баню на 6 минут, а затем снова охлаждали на льду. К охлажденным образцам добавляли 100 мкл 0,2%-ного раствора карбазола и кипятили на водяной бане 10 минут, затем снова охлаждали на льду. Содержание пектиновых веществ анализировали спектрофотометрическим методом на приборе Hitachi U-1100 (Япония) при длине волны 535 нм. Для построения калибровочной кривой использовали известные концентрации галактуроновой кислоты (Sigma-Aldrich, США).

Степень этерификации (DE) образцов пектина оценивали методом ИК-спектрофотометрии на приборе FT-IR Spectrum One (Perkin Elmer, США), оснащенный программой Quant+ с возможностью количественного анализа компонентов в сложных смесях. Спектры регистрировались в режиме пропускания в диапазоне волновых чисел $4000\text{--}400 \text{ см}^{-1}$ с разрешением 4 см^{-1} .

Для расчета DE использовали формулу [4]:

$$\text{DE (\%)} = \frac{A_{1730}}{A_{1730} + A_{1600}}$$

Определение размера клеток

Размер клеток определяли при помощи светового микроскопа Carl Zeiss Jena (Германия).

Статистическая обработка результатов

Ткани одного плода рассматривали как одну биологическую повторность. Каждый опыт проводили в 3–4 биологических повторностях. Статистическую обработку результатов проводили с использованием пакета Microsoft Excel 2016. Для всех случаев приведены средние значения и их стандартные ошибки. Достоверность различий между вариантами определяли с помощью t-критерия Стьюдента ($P \leq 0,5$).

Результаты и обсуждение

По результатам, представленным в Таблице 1, можно видеть, что в процессе гибридизации размер плодов существенно увеличивается. Так, если вес плодов яблони сибирской составлял в среднем 0,75 г, то в гибридах первого поколения этот показатель составлял до 20–30 г и до 70 г в гибридах второго поколения (сорта Неженка и Алтайское румяное).

Таблица 1.

Морфологические характеристики исследованных генотипов

Генотип	Степень гибриднойности	Вес плодов, г	Размер клеток, мкм
Яблоня сибирская	<i>M. baccata</i>	0,75-1	17,10±3,27
Ранетка пурпуровая	F1	7-10	49,39±10,74
Добрыня	F1	6-10	31,19±6,25
Сибирский сувенир	F1	21-38	18,99±2,33
Пальметта	F1	25-33	23,08±3,45
Красноярское зимнее	F2	35-40	19,30±2,93
Красноярский пепинчик	F2	15-20	19,69±2,63
Красноярское сладкое	F2	50-60	20,05±3,16
Живинка	F2	12-15	19,86±4,23
Подарок БАМу	F2	9-10	17,68±2,63
Алтайское румяное	F2	55-70	24,73±3,40
Неженка	F3	48-50	21,98±3,03
Чудное	<i>M. domestica</i>	40-70	22,8±3,07
Раннее Болоньева	<i>M. domestica</i>	75-120	23,87±3,81

Следует отметить, большой разброс значений размеров клеток у разных генотипов. От 17,10 мкм у яблони сибирской и 17,68 у Подарок БАМу до 49,39 мкм у Ранетки пурпуровой и 31,19 мкм у Добрыни. Размер клеток у гибридов не коррелировал с размером плодов. Вполне возможно, что по параметру размера клеток у гибридов F1 проявляется эффект гетерозиса. Размеры клеток плодов в поколениях F2, F3 и группе яблони домашней примерно одинаковы, в среднем составляют около 22-23 мкм.

Таблица 2.

Содержание пектиновых фракций (мг/г сырого веса) и степень их этерификации (%) в тканях плодов исследованных генотипов

Вид	Водорастворимый пектин, мг/г сырого веса	DE, %	Протопектин, мг/г сырого веса	DE, %
Яблоня сибирская	0,067±0,020	53	0,188±0,023	57
Ранетка пурпуровая	0,078±0,014	69	0,137±0,014	58
Добрыня	0,023±0,009	54	0,165±0,052	64
Сибирский сувенир	0,057±0,010	68	0,019±0,015	64
Пальметта	0,014±0,006	56	0,047±0,025	58
Красноярское зимнее	0,030±0,003	71	0,055±0,009	68
Красноярский пепинчик	0,075±0,001	57	0,163±0,038	64

Красноярское сладкое	0,043±0,003	76	0,079±0,034	71
Живинка	0,023±0,001	56	0,036±0,002	70
Подарок БАМу	0,062±0,003	57	0,041±0,025	65
Алтайское румяное	0,049±0,002	67	0,042±0,003	68
Неженка	0,028±0,001	73	0,045±0,008	69
Чудное	0,041±0,013	60	0,062±0,004	58
Раннее Болоняева	0,006±0,004	58	0,019±0,006	60

Данные, представленные в Таблице 2, показывают, что в тканях плодов яблони сибирской наблюдается самое большое содержание протопектина (ПП) – 0,188 мг/г сырого веса, и достаточно высокое содержание водорастворимого пектина (ВрП) – 0,067 мг/г сырого веса. Однако, степень этерификации у пектинов яблони сибирской в обеих фракциях довольно высокая, в среднем от 53% до 57%.

В группе генотипов F1 наблюдали большой разброс значений содержания как ВрП, так и ПП. Наименьшее содержание ВрП – 0,019 мг/г сырого веса отмечено в тканях плодов Пальметты, наибольшее – 0,078 мг/г сырого веса, в плодах Ранетки пурпуровой. Наибольшим содержанием протопектина также отличались ткани плодов Ранетки пурпуровой и Добрыни – 0,137 и 0,165 мг/г сырого веса соответственно. А наименьшее содержание ПП в группе F1 характерно для тканей плодов Сибирского сувенира – 0,019 мг/г сырого веса. На основании представленных данных, а также анализа морфометрических характеристик плодов, можно предположить, что сорта Пальметта и Сибирский сувенир не являются гибридами первого поколения. Данное заключение основывается на том, что фенотипические и биохимические признаки этих сортов не соответствуют ожидаемым характеристикам гибридов F1, что подтверждается статистическими методами и сравнительным анализом с контрольными образцами.

Степень этерификации в гибридах F1 довольно высокая, в среднем составляет 61-62 % как в ВрП, так и в ПП. Наибольшая степень этерификации отмечается в ВрП плодов Ранетки пурпуровой, Сибирского сувенира; ПП – Добрыни и Сибирского сувенира.

В группе генотипов F2 наблюдали схожие между собой показатели содержания пектиновых веществ. В среднем, содержание ВрП составляет 0,05 мг/г сырого веса, а ПП – 0,07 мг/г сырого веса. Наибольшим содержанием как ВрП, так и ПП выделялся сортовой гибрид Красноярский пепинчик – в тканях его плодов содержалось 0,075 мг/г и 0,163 мг/г сырого веса, соответственно. Наименьшим содержанием обеих пектиновых фракций характеризовался сорт

Живинка-0,023 и 0,036 мг/г сырого веса соответственно. В поколении F3 наблюдается достаточно высокая степень этерификации пектиновых фракций во всех исследованных генотипах, и в среднем она составляла 64% в ВрП и 68% в ПП. Самая высокая степень этерификации наблюдалась в генотипах Красноярское зимнее, Красноярское сладкое, Алтайское румяное.

Представитель F3 – генотип Неженка, имел относительно низкое содержание пектинов обеих фракций. Однако степень этерификации как ВрП, так и ПП была высокая – 73% и 69%, соответственно. Оба представителя яблони домашней имели свои особенности в содержании пектинов. У сорта Чудное наблюдали характерное для поколений F1 и F2 содержание пектина в его плодах, а ткани плодов сорта Раннее Болоняева имели минимальное относительно других генотипов содержание пектиновых веществ - 0,006 мг/г сырого веса ВрП и 0,019 мг/г сырого веса ПП. Этерификация в обоих генотипах наблюдалась довольно высокая – 58-60%.

Как видно из Таблицы 3, в тканях плодов яблони сибирской основные растворимые углеводы были в основном представлены сорбитолом и сахарозой. Содержание сорбитола достигало 24%, сахарозы – 55% от суммы сахаров. Доминирующим растворимым углеводом в тканях всех остальных исследованных генотипов, была фруктоза, её содержание варьировалось от 36% до 70%. Что касается абсолютного содержания сахаров в тканях плодов гибридов, их определяли отдельно для кожуры и пульпы.

Таблица 3.

Содержание растворимых углеводов (мг/г сырого веса) в тканях плодов исследованных генотипов

Генотип	Кожура				Пульпа			
	Фруктоза	Сорбитол	Глюкоза	Сахароза	Фруктоза	Сорбитол	Глюкоза	Сахароза
Яблоня сибирская	0,93±0,14	2,33±0,31	2,15±0,48	4,71±0,81	1,12±0,18	2,27±0,27	-	5,91±0,66
Ранетка пурпуровая	5,48±1,94	1,34±0,52	5,62±2,21	-	5,56±0,98	1,14±0,20	5,03±1,19	-
Добрыня	2,89±0,06	1,01±0,06	1,51±0,02	1,31±0,12	5,04±0,75	1,31±0,16	2,94±0,23	1,67±0,28
Сибирский сувенир	4,45±1,23	0,14±0,20	0,39±0,55	3,16±1,17	4,79±0,90	0,97±0,23	-	1,98±0,73
Пальметта	4,24±2,85	0,676±0,73	4,182±2,77	3,12±0,15	4,37±2,78	0,80±0,73	1,70±0,15	1,16±0,11
Красноярское зимнее	7,60±1,28	1,38±0,48	0,67±0,31	0,47±0,67	7,93±0,89	1,61±0,48	2,67±0,31	1,62±0,46
Красноярский пепинчик	4,64±1,05	1,37±1,00	1,09±0,51	3,99±1,17	6,97±1,20	3,47±1,03	0,46±0,17	1,22±0,34

Красноярское сладкое	1,44±0,17	-	-	3,13±0,34	3,71±1,48	2,26±0,07	0,66±0,08	2,75±1,73
Живинка	3,36±0,05	0,28±0,05	0,25±0,06	3,62±0,62	4,75±0,34	0,33±0,07	0,25±0,02	3,53±0,82
Подарок БАМу	4,76±3,32	1,00±1,43	2,40±4,22	1,09±0,47	4,54±1,03	2,33±0,83	0,72±0,22	2,35±0,91
Алтайское румяное	5,38±2,38	1,38±0,92	-	3,03±1,07	4,20±0,87	0,85±0,39	-	3,26±2,45
Неженка	4,22±1,10	0,09±0,12	0,72±0,85	1,12±0,16	5,01±1,46	0,18±0,13	0,14±0,20	4,63±6,54
Чудное	1,27±0,13	0,15±0,05	0,15±0,09	2,56±0,15	3,45±0,09	0,48±0,04	0,68±0,15	4,34±0,34
Раннее Болоняева	4,51±3,50	0,11±0,03	0,38±0,16	1,39±0,29	5,66±3,75	0,75±0,24	0,82±0,24	5,42±1,83

В поколении F1 самым высоким содержанием сорбита как в коже, так и в пульпе – 1,34 мг/г и 1,14 мг/г сырого веса, соответственно, отличалась Ранетка пурпуровая. Самый высокий уровень глюкозы наблюдали также в тканях плодов Ранетки пурпуровой – до 5,62 мг/г и коже сорта Пальметта – 4,18 мг/г.

В поколении F2 самое высокое содержание фруктозы наблюдали в тканях плодов Красноярского зимнего – 7,6 мг/г в коже и 7,93 мг/г в пульпе, соответственно, пульпе Красноярского пепинчика – 6,97 мг/г и коже Алтайского румяного – 5,38 мг/г.

Высокое содержание сорбитола наблюдали также в тканях Красноярского зимнего – 1,38 мг/г в коже и 1,61 мг/г в пульпе, Красноярского пепинчика – 1,37 мг/г и 3,47 мг/г соответственно. Содержание глюкозы во всех генотипах F2 было ниже, чем в поколении F1 и яблоне сибирской.

Содержание сахарозы в коже генотипов F2 варьировало от 0,74 мг/г до 3,99 мг/г, в пульпе – от 1,22 мг/г до 3,53 мг/г.

Ткани генотипа F3 Неженка и генотипы яблони домашней отличались низким содержанием сорбитола – от 0,09 мг/г до 0,15 мг/г в коже и от 0,15 мг/г до 0,48 мг/г в пульпе; глюкозы – то 0,15 мг/г до 0,72 мг/г в коже и 0,14 мг/г – 0,68 мг/г в пульпе.

Как известно, углеводы являются продуктом фотосинтеза и одним из основных компонентов тканей растений. Фотоассимилянты в виде транспортных форм (сорбитол и сахароза) перемещаются из листьев в аттрагирующие ткани плодов и участвуют в процессе их роста и развития. Растворимые сахара обеспечивают плоды энергией для поддержания клеточного деления и последующего роста клеток. Стадия пролиферации в плодах яблонь завершается примерно через 4 недели после опыления [21]. После чего накопленный сорбит и сахароза, поступившие в незрелые плоды, могут конвертироваться в запасующие углеводы, такие как фруктоза

и глюкоза; полимеризоваться в компоненты клеточной стенки (пектин, лигнин); в зависимости от потребностей растения, метаболизироваться в другие соединения, такие как, например, аскорбиновая кислота.

Установлено, что плоды яблони сибирской в отличие от яблони домашней, имеют очень высокое содержание АК, сравнимое с таковым в плодах красной смородины и облепихи [6; 8]. Следует отметить, что ткани плодов исследованных гибридных генотипов содержали меньше АК, чем плоды яблони сибирской, но гораздо больше, чем ткани яблони домашней [10; 11].

Как известно, комплекс растворимых углеводов и органических кислот отвечает за формирование сладости и вкуса яблок. В плодах различных сортов *M. domestica* доминирующим растворимым углеводом является фруктоза [12; 24; 15]. Как показали проведенные нами исследования, в тканях гибридных генотипов, содержание фруктозы варьировало от 36% до 70% от суммы сахаров. В тканях плодов яблони сибирской доминирующими растворимыми углеводами были именно транспортные формы - сорбитол и сахароза. В процессе гибридизации, содержание сорбитола в тканях плодов существенно снижалось и было минимальным в плодах яблони домашней. Можно предположить, что особенности углеводного метаболизма родительского генотипа (яблони сибирской) и/или короткий вегетационный период резко-континентального климата Восточной Сибири приводят к затруднениям в конвертации транспортных сахаров (сахарозы и сорбита) в запасующие (фруктозу) [17; 10]. Логично предположить, что такой углеводный состав отрицательно влияет на размер и вкус плодов яблони сибирской и её гибридов. Кроме того, возможно, с таким составом углеводов отчасти связан и размер клеток, который важен для формирования текстуры созревших плодов.

Пектины представляют собой большое семейство полисахаридов клеточной стенки растений, выполняющих различные функции. Известно, что соотношение фракций водорастворимого пектина и протопектина в плодах некоторых культурных растений напрямую связано со стадией их созревания, по мере приближения к стадии биологической зрелости количество протопектина в них уменьшается [23; 19]. У большинства исследованных нами генотипов содержание протопектина было выше, чем водорастворимой пектиновой фракции. Общее содержание пектина в плодах уменьшалось от яблони сибирской к генотипам яблони домашней. Этерификация обеих фракций пектина всех исследованных была высокой, выше 50% [13]. Как известно, компоненты клеточной стенки, такие как целлюлоза,

гемицеллюлоза, пектины и лигнин, имеют решающее значение для формирования иммунитета растений, поскольку мутации генов, связанных с биосинтезом или модификацией клеточной стенки, приводит к изменениям в устойчивости к болезням у многих видов [21; 5]. В исследовании Лионетти и др. [14] было продемонстрировано что изменение степени этерификации пектина играет важную роль во взаимодействии растений с патогенами. Дезэтерификация пектина влияет на восприимчивость клеточной стенки к грибковым и бактериальным ферментам, а также на структуру и функциональность механизмов проникновения и распространения вирусов. Олигомеры галактуроновой кислоты, высвобождающиеся из клеточной стенки при заражении патогенами, играют роль сигнальных молекул, запускающих каскадные реакции иммунного ответа, что приводит, в итоге, к повышению устойчивости растений к болезням. Как известно, яблоня сибирская и исследованные в этой работе сорта, обладающие значительным содержанием пектинов и их высокой этерификацией имеют высокую устойчивость к ряду заболеваний, в том числе широко распространённой парше, вызываемой грибом *Venturia inaequalis* [2].

Ранее было показано, что размер клеток плодов яблони в среднем составляет от 50 до 150 мкм. [9]. Как уже говорилось выше, размер клеток плодов исследованных нами генотипов, включая поколения F3 и сорта яблони домашней, в среднем составляли 17-25 мкм и самым большим был у ранетки пурпуровой – около 50 мкм. Безусловно, размер клеток растений определяется множеством факторов, включая генетические особенности, условия окружающей среды и биохимические процессы [16; 7]. Однако, размер клеток мякоти может быть важным фактором при формировании восприимчивости плодов к поражению грибами и другими патогенами у различных сортов яблони [18]. Так, самый большой из исследованных генотипов размер клеток у плодов Ранетки пурпуровой сопровождается наименьшей её устойчивостью к поражению паршой [1]. Можно предположить, что совокупность высокого содержания пектинов, степени их этерификации и размера клеток является одним из аспектов, формирующих устойчивость исследованных генотипов к патогенам.

Заключение

Плоды гибридов яблони сибирской существенно отличаются от сортов яблони домашней высоким содержанием и этерификацией пектинов, количеством и качеством растворимых углеводов. Эти генотипы, по-видимому, в силу особенностей биохимического состава, имеют более высокую рези-

стентность к патогенам. Выявление и выведение новых гибридов яблони сибирской с наиболее оптимальным комплексом агротехнических и потребительских качеств, а также систематизация и анализ биохимических параметров, в том числе анализ углеводного состава - важная задача адаптивной селекции, способствующая выведению новых сортов в условиях рискованного земледелия.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено в рамках реализации государственных заданий СИФИБР СО РАН № 0277-2025-0006 «Изучение механизмов формирования, поддержания и регуляции устойчивого состояния растений: генетические, физиолого-биохимические, эволюционные и экологические аспекты» и ФНЦ ИЦИГ СО РАН по проекту № FWNR-2022-0017 «Генетический контроль развития и формирования хозяйственно-ценных признаков у сельскохозяйственных растений». В работе использовано оборудование ЦКП «Биоаналитика» СИФИБР СО РАН и ЦКП репродукции растений ИЦИГ СО РАН.

Список литературы

1. Макаренко, С. А., & Артюх, С. Н. (2015). Оценка селекционного фонда яблони с выделением источников полигенной устойчивости к парше. *Плодоводство и виноградарство Юга России*, (35), 13–27. EDN: <https://elibrary.ru/UIRMVX>
2. Макаренко, С. А., & Калинина, И. П. (2016). Генетический потенциал в селекции яблони на юге Западной Сибири. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*, 177(1), 91–109. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2016-1-91-109>. EDN: <https://elibrary.ru/VXBWLW>
3. Савельев, Н. И., Лыжин, А. С., & Савельева, Н. Н. (2016). Отбор перспективных генотипов яблони на колонновидность и устойчивость к парше с помощью диагностических ДНК-маркеров. *Вавиловский журнал генетики и селекции*, 20(3), 329–332. <https://doi.org/10.18699/VJ16.122>. EDN: <https://elibrary.ru/PSROYL>
4. Dranca, F., Vargas, M., & Oroian, M. (2020). Physicochemical properties of pectin from *Malus domestica* 'Falticeni' apple pomace as affected by non-conventional extraction techniques. *Food Hydrocolloids*, 100, 105383. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105383>. EDN: <https://elibrary.ru/DYVCZG>
5. Engelsdorf, T., Will, C., Hofmann, J., Schmitt, C., Merritt, B. B., Rieger, L., Frenger, M. S., Marschall, A., Franke, R. B., Pattathil, S., & Voll, L. M. (2017). Cell wall composition and penetration resistance against the fungal pathogen

- Colletotrichum higginsianum* are affected by impaired starch turnover in *Arabidopsis* mutants. *Journal of Experimental Botany*, 68(3), 701–713.
6. Fang, T., Zhen, Q., Liao, L., Owiti, A., Zhao, L., Korban, S. S., & Han, Y. (2017). Variation of ascorbic acid concentration in fruits of cultivated and wild apples. *Food Chemistry*, 225, 132–137.
 7. Harada, T., Kurahashi, W., Yanai, M., Wakasa, Y., & Satoh, T. (2005). Involvement of cell proliferation and cell enlargement in increasing the fruit size of *Malus* species. *Scientia Horticulturae*, 105(4), 447–456.
 8. Kapur, A., Hasković, A., Čopra-Janićijević, A., Klepo, L., Topčagić, A., Tahirović, I., & Sofić, E. (2012). Spectrophotometric analysis of total ascorbic acid content in various fruits and vegetables. *Bulletin of the Chemists and Technologists of Bosnia and Herzegovina*, 38(4), 39–42.
 9. Khan, A. A., & Vincent, J. F. V. (1990). Anisotropy of apple parenchyma. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 52(4), 455–466.
 10. Stavitskaya, Z., Dudareva, L., Rudikovskii, A., Garkava-Gustavsson, L., Shabanova, E., Levchuk, A., & Rudikovskaya, E. (2023). Evaluation of the carbohydrate composition of crabapple fruit tissues native to Northern Asia. *Plants*, 12(19), 3472. <https://doi.org/10.3390/plants12193472>. EDN: <https://elibrary.ru/LEVYAR>
 11. Rudikovskaya, E. G., Dudareva, L. V., Shishparenok, A. A., & Rudikovskii, A. V. (2015). Peculiarities of polyphenolic profile of fruits of Siberian crab apple and its hybrids with *Malus × domestica* Borkh. *Acta Physiologiae Plantarum*, 37, 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1993-6>. EDN: <https://elibrary.ru/VAHEDT>
 12. Li, M., Feng, F., & Cheng, L. (2012). Expression patterns of genes involved in sugar metabolism and accumulation during apple fruit development. *PLOS ONE*, 7(3), e33055.
 13. Liang, W. L., Liao, J. S., Qi, J. R., Jiang, W. X., & Yang, X. Q. (2022). Physicochemical characteristics and functional properties of high methoxyl pectin with different degree of esterification. *Food Chemistry*, 375, 131806. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131806>. EDN: <https://elibrary.ru/XIPWYG>
 14. Lionetti, V., Cervone, F., & Bellincampi, D. (2012). Methyl esterification of pectin plays a role during plant-pathogen interactions and affects plant resistance to diseases. *Journal of Plant Physiology*, 169(16), 1623–1630. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.05.006>. EDN: <https://elibrary.ru/RMHPNP>
 15. Ma, B., Chen, J., Zheng, H., Fang, T., Ogutu, C., Li, S., Han, Y., & Wu, B. (2015). Comparative assessment of sugar and malic acid composition in cultivated and wild apples. *Food Chemistry*, 172, 86–91.

16. Malladi, A., & Hirst, P. M. (2010). Increase in fruit size of a spontaneous mutant of ‘Gala’ apple (*Malus × domestica* Borkh.) is facilitated by altered cell production and enhanced cell size. *Journal of Experimental Botany*, 61(11), 3003–3013. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq134>. EDN: <https://elibrary.ru/NZQ-JNN>
17. Mignard, P., Beguería, S., Giménez, R., Font i Forcada, C., Reig, G., & Moreno, M. Á. (2022). Effect of genetics and climate on apple sugars and organic acids profiles. *Agronomy*, 12(4), 827. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040827>. EDN: <https://elibrary.ru/RMOCD A>
18. Naets, M., Wang, Z., Verboven, P., Nicolai, B., Keulemans, W., & Geeraerd, A. (2020). Size does matter — susceptibility of apple for grey mould is affected by cell size. *Plant Pathology*, 69(1), 60–67.
19. Ornelas-Paz, J. D. J., Quintana-Gallegos, B. M., Escalante-Minakata, P., Reyes-Hernández, J., Pérez-Martínez, J. D., Rios-Velasco, C., & Ruiz-Cruz, S. (2018). Relationship between the firmness of Golden Delicious apples and the physicochemical characteristics of the fruits and their pectin during development and ripening. *Journal of Food Science and Technology*, 55, 33–41. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2758-6>. EDN: <https://elibrary.ru/BVAVVU>
20. Taylor, K. A., & Buchanan-Smith, J. G. (1992). A colorimetric method for the quantitation of uronic acids and a specific assay for galacturonic acid. *Analytical Biochemistry*, 201(1), 190–196.
21. Tijero, V., Girardi, F., & Botton, A. (2021). Fruit development and primary metabolism in apple. *Agronomy*, 11(6), 1160. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061160>. EDN: <https://elibrary.ru/WXGHVU>
22. Wan, J., He, M., Hou, Q., Zou, L., Yang, Y., Wei, Y., & Chen, X. (2021). Cell wall associated immunity in plants. *Stress Biology*, 1(1), 3. <https://doi.org/10.1007/s44154-021-00003-4>. EDN: <https://elibrary.ru/CUHTGN>
23. Wang, D., Yeats, T. H., Uluisik, S., Rose, J. K., & Seymour, G. B. (2018). Fruit softening: revisiting the role of pectin. *Trends in Plant Science*, 23(4), 302–310.
24. Wu, J., Gao, H., Zhao, L., Liao, X., Chen, F., Wang, Z., & Hu, X. (2007). Chemical compositional characterization of some apple cultivars. *Food Chemistry*, 103(1), 88–93.

References

1. Makarenko, S. A., & Artyukh, S. N. (2015). Evaluation of the apple breeding stock with identification of sources of polygenic resistance to scab. *Fruit Growing and Viticulture of the South of Russia*, (35), 13–27. EDN: <https://elibrary.ru/UIRMXX>

2. Makarenko, S. A., & Kalinina, I. P. (2016). Genetic potential in apple breeding in the south of Western Siberia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*, 177(1), 91–109. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2016-1-91-109>. EDN: <https://elibrary.ru/VXBWLV>
3. Savelyev, N. I., Lyzhin, A. S., & Savelyeva, N. N. (2016). Selection of promising apple genotypes for columnar growth habit and scab resistance using diagnostic DNA markers. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 20(3), 329–332. <https://doi.org/10.18699/VJ16.122>. EDN: <https://elibrary.ru/PSROYL>
4. Dranca, F., Vargas, M., & Oroian, M. (2020). Physicochemical properties of pectin from *Malus domestica* ‘Falticeni’ apple pomace as affected by non-conventional extraction techniques. *Food Hydrocolloids*, 100, 105383. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105383>. EDN: <https://elibrary.ru/DYVCZG>
5. Engelsdorf, T., Will, C., Hofmann, J., Schmitt, C., Merritt, B. B., Rieger, L., Frenger, M. S., Marschall, A., Franke, R. B., Pattathil, S., & Voll, L. M. (2017). Cell wall composition and penetration resistance against the fungal pathogen *Colletotrichum higginsianum* are affected by impaired starch turnover in *Arabidopsis* mutants. *Journal of Experimental Botany*, 68(3), 701–713.
6. Fang, T., Zhen, Q., Liao, L., Owiti, A., Zhao, L., Korban, S. S., & Han, Y. (2017). Variation of ascorbic acid concentration in fruits of cultivated and wild apples. *Food Chemistry*, 225, 132–137.
7. Harada, T., Kurahashi, W., Yanai, M., Wakasa, Y., & Satoh, T. (2005). Involvement of cell proliferation and cell enlargement in increasing the fruit size of *Malus* species. *Scientia Horticulturae*, 105(4), 447–456.
8. Kapur, A., Hasković, A., Čopra-Janičićević, A., Klepo, L., Topčagić, A., Tahirović, I., & Sofić, E. (2012). Spectrophotometric analysis of total ascorbic acid content in various fruits and vegetables. *Bulletin of the Chemists and Technologists of Bosnia and Herzegovina*, 38(4), 39–42.
9. Khan, A. A., & Vincent, J. F. V. (1990). Anisotropy of apple parenchyma. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 52(4), 455–466.
10. Stavitskaya, Z., Dudareva, L., Rudikovskii, A., Garkava-Gustavsson, L., Shabanova, E., Levchuk, A., & Rudikovskaya, E. (2023). Evaluation of the carbohydrate composition of crabapple fruit tissues native to Northern Asia. *Plants*, 12(19), 3472. <https://doi.org/10.3390/plants12193472>. EDN: <https://elibrary.ru/LEVYAR>
11. Rudikovskaya, E. G., Dudareva, L. V., Shishparenok, A. A., & Rudikovskii, A. V. (2015). Peculiarities of polyphenolic profile of fruits of Siberian crab apple and its hybrids with *Malus × domestica* Borkh. *Acta Physiologiae Plantarum*, 37, 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1993-6>. EDN: <https://elibrary.ru/VAHEDT>

12. Li, M., Feng, F., & Cheng, L. (2012). Expression patterns of genes involved in sugar metabolism and accumulation during apple fruit development. *PLOS ONE*, 7(3), e33055.
13. Liang, W. L., Liao, J. S., Qi, J. R., Jiang, W. X., & Yang, X. Q. (2022). Physicochemical characteristics and functional properties of high methoxyl pectin with different degree of esterification. *Food Chemistry*, 375, 131806. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131806>. EDN: <https://elibrary.ru/XIPWYG>
14. Lionetti, V., Cervone, F., & Bellincampi, D. (2012). Methyl esterification of pectin plays a role during plant-pathogen interactions and affects plant resistance to diseases. *Journal of Plant Physiology*, 169(16), 1623–1630. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.05.006>. EDN: <https://elibrary.ru/RMHPNP>
15. Ma, B., Chen, J., Zheng, H., Fang, T., Ogutu, C., Li, S., Han, Y., & Wu, B. (2015). Comparative assessment of sugar and malic acid composition in cultivated and wild apples. *Food Chemistry*, 172, 86–91.
16. Malladi, A., & Hirst, P. M. (2010). Increase in fruit size of a spontaneous mutant of ‘Gala’ apple (*Malus × domestica* Borkh.) is facilitated by altered cell production and enhanced cell size. *Journal of Experimental Botany*, 61(11), 3003–3013. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq134>. EDN: <https://elibrary.ru/NZQJNN>
17. Mignard, P., Beguería, S., Giménez, R., Font i Forcada, C., Reig, G., & Moreno, M. Á. (2022). Effect of genetics and climate on apple sugars and organic acids profiles. *Agronomy*, 12(4), 827. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040827>. EDN: <https://elibrary.ru/RMOCCDA>
18. Naets, M., Wang, Z., Verboven, P., Nicolai, B., Keulemans, W., & Geeraerd, A. (2020). Size does matter — susceptibility of apple for grey mould is affected by cell size. *Plant Pathology*, 69(1), 60–67.
19. Ornelas-Paz, J. D. J., Quintana-Gallegos, B. M., Escalante-Minakata, P., Reyes-Hernández, J., Pérez-Martínez, J. D., Rios-Velasco, C., & Ruiz-Cruz, S. (2018). Relationship between the firmness of Golden Delicious apples and the physicochemical characteristics of the fruits and their pectin during development and ripening. *Journal of Food Science and Technology*, 55, 33–41. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2758-6>. EDN: <https://elibrary.ru/BVAVVU>
20. Taylor, K. A., & Buchanan-Smith, J. G. (1992). A colorimetric method for the quantitation of uronic acids and a specific assay for galacturonic acid. *Analytical Biochemistry*, 201(1), 190–196.
21. Tijero, V., Girardi, F., & Botton, A. (2021). Fruit development and primary metabolism in apple. *Agronomy*, 11(6), 1160. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061160>. EDN: <https://elibrary.ru/WXGHVU>

22. Wan, J., He, M., Hou, Q., Zou, L., Yang, Y., Wei, Y., & Chen, X. (2021). Cell wall associated immunity in plants. *Stress Biology*, 1(1), 3. <https://doi.org/10.1007/s44154-021-00003-4>. EDN: <https://elibrary.ru/CUHTGN>
23. Wang, D., Yeats, T. H., Uluisik, S., Rose, J. K., & Seymour, G. B. (2018). Fruit softening: revisiting the role of pectin. *Trends in Plant Science*, 23(4), 302–310.
24. Wu, J., Gao, H., Zhao, L., Liao, X., Chen, F., Wang, Z., & Hu, X. (2007). Chemical compositional characterization of some apple cultivars. *Food Chemistry*, 103(1), 88–93.

ДАнные ОБ АВТОРАХ

Рудиковская Елена Георгиевна, старший научный сотрудник, к.б.н.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Сибирский институт физиологии и биохимии растений»
ул. Лермонтова, 132, г. Иркутск, 664033, Российская Федерация
rudal69@mail.ru*

Ставицкая Злата Олеговна, ведущий инженер

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Сибирский институт физиологии и биохимии растений»
ул. Лермонтова, 132, г. Иркутск, 664033, Российская Федерация
stavitskaya.zlata@gmail.com*

Дударева Любовь Виссарионовна, заведующая лабораторией физико-химических методов исследования, к.б.н.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Сибирский институт физиологии и биохимии растений»
ул. Лермонтова, 132, г. Иркутск, 664033, Российская Федерация
laser@sifibr.irk.ru*

Семёнова Наталья Викторовна, старший научный сотрудник, к.б.н.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Сибирский институт физиологии и биохимии растений»
ул. Лермонтова, 132, г. Иркутск, 664033, Российская Федерация
tashasemyonova@mail.ru*

Катышева Наталья Баировна, научный сотрудник, к.б.н.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Сибирский институт физиологии и биохимии растений»

*ул. Лермонтова, 132, г. Иркутск, 664033, Российская Федерация
mitanova2014@yandex.ru*

Рудиковский Александр Викторович, ведущий научный сотрудник, к.б.н.
*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Сибирский институт физиологии и биохимии растений»
ул. Лермонтова, 132, г. Иркутск, 664033, Российская Федерация
rudikovalex@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Elena G. Rudikovskaya, Senior Researcher, Ph.D. of Biological Sciences
*Scientific Research Institute «Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry»
132, Lermontov Str., Irkutsk, 664033, Russian Federation
rudal69@mail.ru
SPIN-code: 2570-1492
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5709-2370>
ResearcherID: J-4370-2018*

Zlata O. Stavitskaya, Lead Engineer
*Scientific Research Institute «Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry»
132, Lermontov Str., Irkutsk, 664033, Russian Federation
stavitskaya.zlata@gmail.com
SPIN-code: 7004-0986
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6216-026X>
ResearcherID: AAQ-6281-2021
Scopus Author ID: 57208390540*

Lyubov V. Dudareva, Head of the Laboratory of Physical and Chemical Research Methods, Ph.D. of Biological Sciences
*Scientific Research Institute «Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry»
132, Lermontov Str., Irkutsk, 664033, Russian Federation
laser@sifibr.irk.ru
SPIN-code: 5035-0941
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1185-7467>
ResearcherID: G-8812-2013
Scopus Author ID: 6602801950*

Natalia V. Semenova, Senior Researcher, Ph.D. of Biological Sciences
Scientific Research Institute «Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry»
132, Lermontov Str., Irkutsk, 664033, Russian Federation
tashasemyonova@mail.ru
SPIN-code: 4495-1114
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1076-3944>
ResearcherID: GXF-6209-2022
Scopus Author ID: 57188661726

Natalia B. Katysheva, Research Associate, Ph.D. of Biological Sciences
Scientific Research Institute «Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry»
132, Lermontov Str., Irkutsk, 664033, Russian Federation
mitanova2014@yandex.ru
SPIN-code: 9904-8371
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5847-1695>
ResearcherID: J-4386-2018
Scopus Author ID: 57202500144

Alexander V. Rudikovskii, Leading Researcher, Ph.D. of Biological Sciences
Scientific Research Institute «Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry»
132, Lermontov Str., Irkutsk, 664033, Russian Federation
rudikovalex@mail.ru
SPIN-code: 3125-2320
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8567-0318>
ResearcherID: HPD-0129-2023
Scopus Author ID: 57208387268

Поступила 21.05.2025

После рецензирования 30.06.2025

Принята 02.07.2025

Received 21.05.2025

Revised 30.06.2025

Accepted 02.07.2025