

УДК 577.13;633.8:174.015

ИНДИВИДУАЛЬНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПО СОДЕРЖАНИЮ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПО ISSR-МАРКЕРАМ У *RHODIOLA ROSEA* (CRASSULACEAE) В РЕСПУБЛИКЕ АЛТАЙ

© *Е.В. Жмудь*^{1*}, *О.В. Коцуний*¹, *И.Н. Кубан*¹, *А.А. Ачимова*², *Е.П. Храмова*¹, *А.В. Кабанов*³,
*О.В. Дорогина*¹

¹ Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, ул. Золотодолинская,
101, Новосибирск. 630090, Россия, elenazhmu@gmail.com

² Горно-Алтайский Ботанический сад – филиал ЦСБС СО РАН, урочище
Чистый Луг, Камлак, Республика Алтай, 649218, Россия

³ Главный ботанический сад РАН, ул. Ботаническая, 4, Москва, 127276,
Россия

Исследована индивидуальная изменчивость по содержанию двух основных групп биологически активных соединений (БАС) – фенилпропаноидов (PPtot) и фенилэтаноидов (SALtot) и молекулярно-генетической структуры по ISSR-маркерам у 19 особей в ценопопуляции (ЦП) *Rhodiola rosea* в Республике Алтай. В данной ЦП выявлены 11 типов спектров: I (у шести особей), II (у трех особей), III (у двух особей) и оригинальные (у восьми особей). У 70% мужских особей обнаружено семь оригинальных спектров по ISSR-маркерам. Из пяти проанализированных праймеров выявлен наиболее информативный UBC 857, с помощью которого получены специфические амплифицированные фрагменты ДНК у особей этого вида и паспортизованы формы с относительно более высоким содержанием двух наиболее значимых групп БАС. Высокое содержание PPtot (более 3% в воздушно-сухом сырье) выявлено у 30% мужских и 44% женских особей в данной ЦП, а SALtot (более 0.3%, что выше среднего значения для ЦП) – у 40% мужских и 70% женских особей. Исходя из полученных результатов, в качестве перспективных высокопродуктивных источников БАВ *in vitro* и для выращивания в интродукции рекомендуются четыре формы *Rhodiola rosea*: женские особи с двумя типами спектров и высоким содержанием одной или обеих групп веществ и мужские – с двумя уникальными типами спектров и высоким содержанием PPtot+SALtot и SALtot соответственно.

Ключевые слова: редкие виды, генетическое разнообразие, гендерная дифференциация, маркеры, содержание фенилпропаноидов и фенилэтаноидов, паспортизация высокопродуктивных форм.

Для цитирования: Жмудь Е.В., Коцуний О.В., Кубан И.Н., Ачимова А.А., Храмова Е.П., Кабанов А.В., Дорогина О.В. Индивидуальная изменчивость по содержанию биологически активных соединений и идентификация по ISSR-маркерам у *Rhodiola rosea* (Crassulaceae) в Республике Алтай // Химия растительного сырья. 2025. №2. С. 215–225. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250215773>.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется природным источникам как сырью для разработки новых продуктов с добавленной стоимостью. Фенольные соединения являются наиболее распространенными вторичными метаболитами в растениях, демонстрируя широкий спектр различных биологических активностей, в последние годы им уделяется все больше внимания [1]. *Rhodiola rosea* L. – вид с высокоэффективным накоплением различных групп фенольных соединений, применению которого посвящена обширная литература, так как спектр лечебных свойств этого редкого вида и его использования при лечении различных заболеваний в настоящее время становится все более обширным [2–4]. Характерным и одним из наиболее важных активных ингредиентов считается розавин [5]. Согласно литературным данным, сухие корни *R. rosea* L. уменьшают окислительный стресс в нервных клетках и ингибируют активность

* Автор, с которым следует вести переписку.

ацетилхолинэстераз благодаря содержанию салидрозида и тирозола и гликозидов коричневого спирта (розарин, розавин и розин), которые являются основными биологически активными соединениями, выявленными в корневищах *R. rosea* [6]. Вместе с тем, практически повсеместно в мировом масштабе вид относится к категории уязвимых или исчезающих [7]. В настоящее время в разных странах разрабатываются меры по введению этого вида в культуру [8–11]. Согласно литературным данным, накопление вторичных метаболитов в корневищах является индивидуальной защитной реакцией растений на воздействие неблагоприятных факторов среды [12–14]. Тем не менее, как правило, до настоящего времени идентификация соединений и количественное содержание биологически активных соединений, вырабатывающихся в растениях в ответ на стрессовые воздействия, проводится в образцах, представляющих собой среднюю пробу из популяции [15, 16]. Немногочисленные исследования индивидуальной изменчивости содержания веществ вторичного обмена в настоящее время опубликованы для культивируемых образцов *R. rosea* [17–19].

В ряде исследовательских работ показано, что в Зауралье в растительном сырье *R. rosea* содержится нескольких групп биологически активных соединений (БАС): фенилпропаноиды – ведущая группа, представленная гликозидами коричневого спирта или циннамилгликозидами (розарин, розарин, розин); простые фенолы – вторая группа (салидрозид и тирозол, фенолкарбоновые кислоты); к сопутствующим группам относятся: монотерпены (розидол, розиридин), флавоноиды (производные трицина, гербацетина, кемпферола) и дубильные вещества гидролизуемой группы [20–22].

Перспективным направлением является исследование генетической регуляции биосинтеза значимых вторичных метаболитов. В результате многочисленных исследований продемонстрировано, что биосинтез салидрозида зависит от экспрессии гена *TyDC*, кодирующего тирозиндекарбоксилазу. Следовательно, понимание молекулярно-генетических механизмов открывает возможности для его регуляции и метаболического инжиниринга. В связи с этим, биотехнологические методы могут быть приоритетными для получения салидрозида, розина и их производных на более высоких или, по крайней мере, сравнимых уровнях с дикорастущими или культивируемыми растениями [23].

Rhodiola rosea L. – поликарпическое корневищное раздельнополюе двудомное растение, уязвимый для Сибири вид. Согласно литературным данным, актуален отбор наиболее перспективных форм из природных популяций растений этого вида, имеющего охранный статус, для получения наиболее высоких результатов методами биотехнологии. В частности, обсуждается создание форм адаптированных регенерантов, так как растения этого вида, полученные методом микроразмножения *in vitro* и выращенные *ex vitro*, перспективны для производства лекарственных средств [23]. Исследование индивидуальной изменчивости содержания наиболее значимых вторичных метаболитов биологически активных соединений этого вида важно для проведения отбора форм в природных популяциях, в том числе с целью их введения в культуру и получения действующих групп веществ уже из культивируемых растений без привлечения природных ресурсов этого вида [24]. Также в настоящее время проводится разработка протоколов для гетерологичного производства салидрозида, которое может быть достигнуто, например, в дрожжах *Saccharomyces cerevisiae* и растениях *Nicotiana benthamiana* посредством трансгенной экспрессии генов биосинтеза салидрозида родиолы, для чего необходимы источники генов-доноров [25].

В связи с этим, важной задачей является отбор наиболее ценных генотипов для размножения и различных видов использования без ущерба для дикорастущих ценопопуляций (ЦП), а также их паспортизация.

Для данной цели наиболее адекватными являются методы применения молекулярных маркеров, в частности ISSR, для оценки сохранения и использования генетических ресурсов растений [26]. В литературных источниках нами не обнаружены исследования изменчивости по содержанию биологически активных соединений в индивидуальных образцах корневищ отдельных особей в дикорастущих популяциях этого вида.

Ранее нами проведены исследования содержания БАС у индивидуальных растений из двух ЦП этого вида, произраставших в Республике Алтай (РА) в разных эколого-географических условиях (по шесть особей из каждой ЦП). Показано, что достоверно более высокие значения по накоплению БАС обнаружены в корневищах у растений этого вида на Бащелакском хребте в высокогорном поясе (РА, Усть-Канский район, 2000 м над ур. м.), по сравнению с растениями из ЦП, произраставших в лесном поясе на меньшей абсолютной высоте [27].

Цель данного исследования – определение индивидуальной изменчивости по содержанию двух отдельных групп наиболее значимых вторичных метаболитов – фенилпропаноидов и салидрозида в корневищах зрелых генеративных особей *R. rosea* из природной популяции с Бащелакского хребта в Республике Алтай и паспортизация наиболее перспективных форм с помощью ISSR-маркирования.

Экспериментальная часть

Растительное сырье. Корневища 10 мужских и 9 женских зрелых генеративных особей *R. rosea* собраны в фазе плодоношения в природной ценопопуляции (ЦП) в Республике Алтай (Усть-Канский район, окрестности с. Каракол, абс. высота 1800 м; тундровый пояс; 09.08.2023 г.; 51°13'59.1"с.ш.; 84°27'22.7" в.д.).

Методы исследования содержания вторичных метаболитов. Исследована индивидуальная изменчивость содержания двух групп наиболее значимых БАС – фенилпропаноидов (розарин, розавин, розин, коричный спирт – PPtot), фенилэтаноидов (тирозол и салидрозид – SALtot) и их суммы (PCtot). Образцы для анализа содержания вторичных метаболитов представляли собой точную навеску (0.2000) г высушенных в лабораторных условиях и измельченных корневищ каждой особи из ЦП. Для извлечения фенольных соединений из корневищ проведены две стадии экстракции. Первый этап – мацерация 50% водным этанолом в течение 5 суток. Второй этап – горячая экстракция 70%-ным этанолом в течение 60 мин на водяной бане при температуре 60–70 °С. Объединенный экстракт концентрировали, измеряли общий объем и пропускали через мембранный фильтр с размером пор 0.45 мкм.

ВЭЖХ-анализ проводился с использованием системы Agilent 1200 с диодно-матричным детектором и с автосамплером, с программой обработки данных ChemStation (Agilent Technologies, Санта-Клара, Калифорния, США). Хроматографическое разделение проводили при 25 °С на колонке Диасфер-110-C18 (4.6×150 мм, внутренний диаметр 5 мкм) (ЗАО БиоХимМак СТ, Россия). Подвижная фаза состояла из MeOH (растворитель А) и 0.1% ортофосфорной кислоты в воде (растворитель Б). Градиент начинался со смеси А-В в 22 : 78 (по объему), с последующим линейным градиентом до 70 : 30 (по объему) в течение первых 30 мин, а затем до 100 : 0 (по объему), с 30-й по 32-ю мин. Возврат подвижной фазы к 22 : 78 (об./об.) осуществляли с 32-й по 36-ю мин. Скорость потока устанавливали равной 1 мл/мин. Объем введения образца составлял 10 мкл. Отслеживание хроматограмм проводилось по поглощению при 220, 255, 270, 290, 325, 340, 350 и 360 нм. Фенольные соединения определяли количественно методом внешнего стандарта. Количественное определение тирозола, салидрозида и розавинов проводили по калибровочной кривой для тирозола (Pharmaffiliates Analytics & Synthetics (P) Ltd., Панчкула, Индия), салидрозида и розавина (Aobious, Глостер, Массачусетс, США), соответственно, в диапазоне концентраций 10–300 мкг/мл.

Предел обнаружения (LOD) с отношением сигнал/шум 3.3 или выше ($LOD=3.3 \times \sigma/S$, мкг/мл) и предел количественного определения (LOQ) с отношением сигнал/шум 10 или выше ($LOQ=10 \times \sigma/S$, мкг/мл) определяли для салидрозида и тирозола. Линейность определялась с использованием пяти различных концентраций на стандартный образец в диапазоне от 10 мкг/мл до 300 мкг/мл с линейной зависимостью. Каждый образец измеряли в двух повторностях. Для салидрозида квадрат коэффициента корреляции $R^2=0.9971$, уравнение регрессии $y=7.935x+55.143$, LOD = 16.2 мкг/мл, LOQ=49.2 мкг/мл. Для тирозола $R^2=0.998$, уравнение регрессии $y=5.9321x+33.843$, LOD=13.1 мкг/мл, LOQ=39.6 мкг/мл. Концентрации фенольных соединений выражали в мг на 100 г воздушно-сухой массы (влажность 6%). В каждом анализе обрабатывали два биологических и два аналитических повтора. Относительная ошибка методики $\pm 2.95\%$.

Материалы и методы проведения молекулярно-генетического анализа. ДНК получена из фрагментов корневищ отдельных особей (около 1.5–2 см), высушенных в лабораторных условиях и нарезанных ломтиками (слайсами) в поперечном направлении. ДНК выделена стандартными методами [28]. Использованы пять праймеров: UBC826, UBC834 UBC 857 и UBC881, НВ 10. Из них UBC 857 оказался наиболее информативным. Анализ и визуализация результатов проведены с помощью Программного пакета TREECON 1.3b и специализированного макроса GenAlEx6 для MS-Excel.

Обсуждение результатов

Наши исследования показали, что в данной ЦП обнаружено относительно высокое среднее содержание PCtot (табл. 1, рис. 1). В корневищах у мужских (2, 4, 6) и женских (12, 14, 18) особей в данной ЦП содержание PPtot составляло более 3000 мг/100 г. Содержание SALtot не превышало 590 мг/100 г воздушно-сухой массы (M₄) (табл. 1). Нами обнаружены две мужские (20%) и три женские (33.3%) особи, характеризовавшиеся максимальными значениями по накоплению этих обеих групп БАС и общему их содержанию, что составило около 26.3% от числа изученных особей данной ЦП.

При анализе содержания этих двух основных групп БАС у представителей из разных гендерных групп нами выявлено относительно более высокое общее содержание фенилпропаноидов у трех (30%)

особей мужского и четырех (44%) особей женского пола, а салидрозида и тирозола – у 4 (40%) мужского и семи (77.8%) особей женского пола. То есть, по нашим данным, женские особи являются более высокопродуктивными в отношении накопления этих двух групп БАС. В результате проведенных исследований в двух гендерных группах особей в данной ЦП нами не выявлено статистически достоверных отличий средних значений по накоплению этих групп БАС. Тем не менее, среди женских особей обнаружена более высокая доля с высокими показателями накопления этих групп веществ. У мужских особей нами выявлена более высокая амплитуда значений содержания исследованных групп веществ (PPtot и PCtot) (табл. 1).

Проведенное исследование показало определенную изменчивость по электрофоретическим спектрам продуктов амплификации ДНК в данной ЦП. У ее особей выявлены три типа повторяющихся спектров распределения ISSR-маркеров (I, II, III) и восемь уникальных (в общей сложности – 11) типов (табл. 1, рис. 2).

Относительно более высокое содержание суммы двух групп веществ выявлено у одной мужской (2) и двух женских (12, 18) особей из данной ЦП (рис. 1).

Анализ электрофореграмм у особей из двух гендерных групп *R. rosea* показал, что для большинства мужских особей (7 из 10) характерны уникальные электрофоретические спектры по ISSR-маркерам (табл. 1, рис. 2). Также у двух особей из этой группы выявлен спектр I типа, а у другой – II типа. Доля полиморфных локусов в данной гендерной группе оказалась также более высокой (почти 89%), по сравнению с изученными параметрами в группе женских особей (табл. 2). У женских особей мы выделили четыре типа спектров: I (4 особи), II (2 особи), III (2 особи) и один тип (около 11%) – уникальный (15) (рис. 2). Доля полиморфных локусов в этой группе особей оказалась вдвое более низкой.

Таблица 1. Содержание исследуемых групп веществ (мг/100 г) в корневищах у особей *Rhodiola rosea* в природной ЦП (Республика Алтай, Усть-Канский район, окрестности села Каракол, 2023 г.)

№/ГТ	PPtot	SALtot	PCtot	PPtot/ SALtot	№/ГТ	PPtot	SALtot	PCtot	PPtot/ SALtot
Мужская группа особей (М)					Женская группа особей (F)				
1/М I	1244.31	242.46	1486.77	5.1	11/F II	2685.03	437.56	3122.59	6.1
2/М I	3768.29	260.49	4028.78	14.5	12/F III	3671.90	444.06	4115.96	8.3
3/М ₃	2194.52	279.53	2474.05	7.9	13/F II	2366.13	348.12	2714.25	6.8
4/М ₄	3168.53	589.19	3757.72	5.4	14/F I	3258.00	325.27	3583.28	10.0
5/М ₅	2617.05	490.76	3107.81	5.3	15/F ₁₅	2674.62	475.50	3150.13	5.6
6/М ₆	3345.16	352.93	3698.09	9.5	16/F I	2607.10	346.38	2953.48	7.5
7/М ₇	2636.83	316.73	2953.56	8.3	17/F III	2545.92	214.65	2760.57	11.9
8/М II	2494.05	249.24	2743.29	10.0	18/F I	4071.14	333.43	4404.57	12.2
9/М ₉	2108.32	254.23	2362.56	8.3	19/F I	3399.33	182.53	3581.86	18.6
10/М ₁₀	2301.41	283.80	2585.21	8.1	–	–	–	–	–
Средние значения для группы мужских особей					Средние значения для группы женских особей				
X _{ср} ±m	2587.8±225.8	331.9±37.0	2919.8±242.2	8.2±0.9	X _{ср} ±m	3031.0±196.6	345.8±33.2	3376.3±197.2	9.7±1.4
Cv, %	27.59	35.24	26.23	33.8	Cv, %	19.46	28.84	17.53	42.5
min	1244.31	242.46	1486.77	5.1	min	2366.13	182.53	2714.25	5.6
max	3768.29	589.19	4028.78	14.5	max	4071.14	475.50	4404.57	18.6
max/ min	3.0	2.4	2.7	2.8	max/ min	1.7	2.6	1.6	3.3
Показатели по выборке из ЦП									
	PPtot		SALtot		PCtot		PPtot/SALtot		
X _{ср} ±m	2797.8±155.8		338.3±24.4		3136.0±162.8		8.9±0.8		
Cv, %	24.3		31.4		22.6		38.7		

Обозначения: PPtot – фенилпропаноиды; SALtot – фенилэтаноиды; PCtot – сумма (PPtot + SALtot); I, II, III, М₃–М₇, М₉, М₁₀, F₁₅ – обозначения генотипов особей: Male (M) – мужских, F – Female (F) – женских; X_{ср}±m – среднее значение с ошибкой; Cv, % – коэффициент вариации; max, min, max/min – максимальные и минимальные значения и их соотношение.

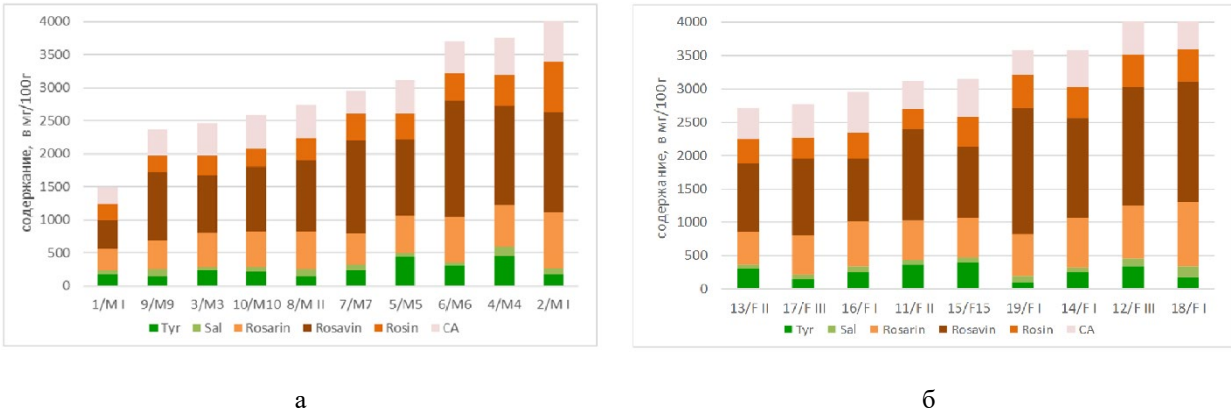


Рис. 1. Изменчивость содержания БАС в мужских (а) и женских (б) растениях *Rhodiola rosea* в Республике Алтай (Усть-Канский район, окрестности села Каракол, 2023 г.). Обозначения: Tyr – тирозол, Sal – салидрозид, СА – коричный спирт. По оси X – номера растений и обозначение генотипа (через слэш). Нумерация дана по возрастанию содержания PCtot

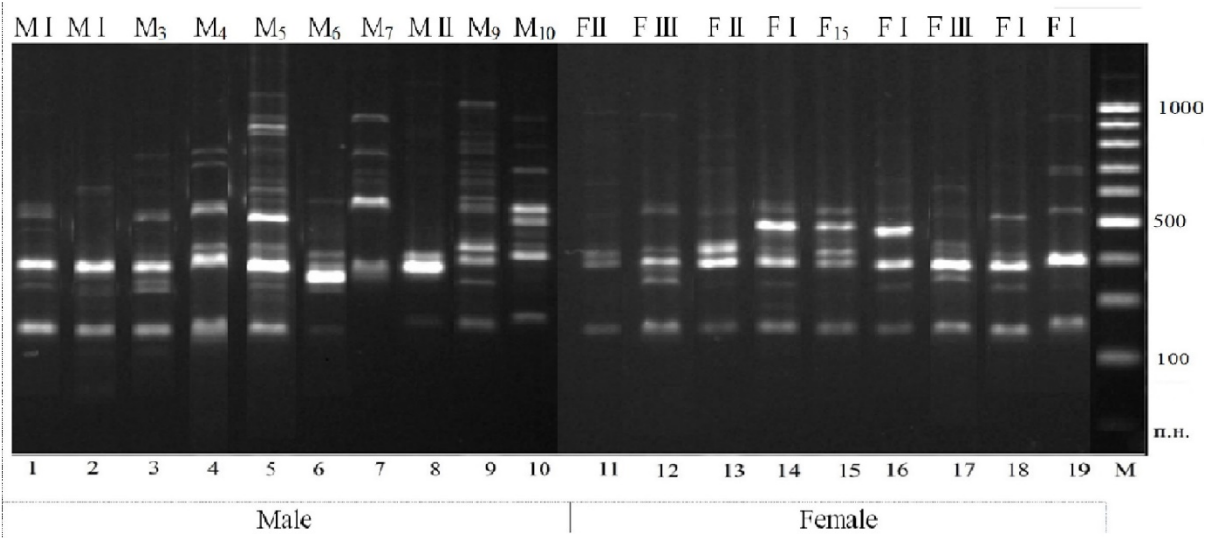


Рис. 2. Электрофореграмма продуктов амплификации с праймером UBS-857 в популяции *Rhodiola rosea* в Республике Алтай (Усть-Канский район, окрестности села Каракол, 2023 г.). Вверху – обозначения типов распределения как в таблице 1; внизу цифрами обозначены номера особей: мужских (1–10) и женских (11–19)

Таблица 2. Гендерно-специфические параметры генетического разнообразия в популяции *Rhodiola rosea* в Республике Алтай (Усть-Канский район, окрестности села Каракол, 2023 г.)

Среднее значение и стандартная ошибка по локусам для мужской и женской частей популяции							
	Параметры	N	Na	Ne	He	uHe	P (%)
Мужская (М)	X _{ср}	10	1.778	1.425	0.262	0.276	88.89
	m	–	0.222	0.117	0.056	0.059	44.44
Женская (F)	X _{ср}	9	1.111	1.255	0.155	0.164	66.67
	m	–	0.309	0.115	0.066	0.070	22.22
Общее среднее и стандартная ошибка по локусам для всей популяции							
Total	X _{ср}	9.500	1.444	1.340	0.209	0.220	66.67
	m	0.121	0.202	0.082	0.044	0.046	22.22

Обозначения: X_{ср} – среднее значение; m – ошибка; Ne – ожидаемая гетерозиготность; uHe – объективная ожидаемая гетерозиготность; Na – число аллелей; Ne – число эффективных аллелей; P (%) – доля полиморфных локусов

В результате проведенных нами более ранних работ в шести ЦП *Adonis villosa*, уязвимого вида в РА, обнаружено только пять типов спектров при 93% сходстве между представителями этого вида [29]. В разных ЦП *R. rosea* доля полиморфных локусов составила от 0 до 83%. Нулевые значения этого показателя выявлены в изолированных ЦП этого вида, где присутствовало антропогенное воздействие на растения (выпас) [30].

В данном исследовании в изученной нами ЦП *R. rosea* антропогенного влияния не выявлено и при этом в результате ISSR-анализа обнаружено 11 типов спектров, что может свидетельствовать о ее достаточной устойчивости.

Согласно литературным данным, в результате изучения содержания БАС в индивидуальных образцах в популяции *Lilium pumilum* выделен наиболее перспективный клон в отношении содержания всех исследованных фенольных компонентов [31]. Выбор перспективных форм *R. rosea* продиктован относительно более высоким содержанием (выше средних значений, полученных для всей ЦП) в корневищах у особей обеих или какой-либо одной из двух групп БАС. Сопоставление полученных нами данных ISSR-маркирования и содержания (PPtot и SALtot) в данной ЦП показало, что наибольшее содержание обеих групп БАС обнаружено у двух мужских особей, обладавших уникальными генотипами (4 и 6). Относительно более высокое содержание одной из этих групп, SALtot, выявлено также у двух мужских особей с уникальными типами спектров ISSR-маркеров (5 и 7). У особи с I типом распределения (2) выявлено высокое содержание PPtot. У остальных 50% мужских особей из данной ЦП высоких значений содержания одной или обеих этих групп веществ в корневищах нами не выявлено. Они принадлежали к I (1, 3), II (8) и характеризовались уникальными M₉ и M₁₀ (9, 10) типами спектров (рис. 1, табл. 2).

Таким образом, в корневищах у мужских особей *R. rosea* с уникальными типами спектров M₄ и M₆ выявлено наиболее высокое содержание PPtot+SALtot, у M₅ и M₇ – SALtot, поэтому их можно рассматривать в качестве перспективных форм с высоким содержанием БАС. Мужские особи типа I не всегда ассоциированы с высоким содержанием БАС, а у мужской особи типа II не выявлено высоких значений содержания этих групп веществ в корневище.

В данной ЦП также выявлены четыре женские особи типа I с более высокими значениями PPtot+SALtot (14, 18) или только одной из изученных групп веществ: у особи 19 выявлено высокое содержание PPtot, а у особи 16 – SALtot. Женские особи типа F II (11, 13) и особь 15 из данной гендерной группы с уникальным генотипом (F₁₅) также обладали относительно более высоким содержанием SALtot. Женские особи типа F III характеризовались либо более высоким (12), либо сниженным содержанием БАС (17) (табл. 1, рис. 2).

Таким образом, у женских особей тип I ассоциирован с более высоким содержанием PPtot+SALtot (14 и 18), либо какого-то одного из них: PPtot (19), или SALtot (16), а тип F₁₅ – с более высоким содержанием SALtot.

Согласно фармакопейным стандартам, соотношение розавинов и салидрозидов должно составлять не менее 1 : 3.5 [32]. В данной ЦП оно изменялось в более широких пределах и составляло, в среднем, 1 : 9 (табл. 1).

За основу проведения паспортизации четырех высокопродуктивных форм *R. rosea* взяты рекомендации А.А. Новиковой с соавт. [33]. Для этого нами отобраны наиболее продуктивные женские особи I, а также уникального типа (F₁₅). Мужские особи I и II типа и женские особи III типа не во всех исследованных случаях оказывались высокопродуктивными по накоплению этих соединений. У *R. rosea* доля высокопродуктивных женских особей оказалась в целом более высокой, чем мужских (88.9 и 50% соответственно). Но у мужских особей в данной ЦП доля уникальных генотипов, по данным ISSR-маркирования, выше, чем у женских (70 и 10% соответственно). Вероятно, женские особи являются носителями устойчивости, которая может быть обусловлена возможностью синтеза большего количества исследованных БАС, связанных с более высокими адаптивными возможностями растений этого вида. Поэтому мы рекомендуем проводить паспортизацию продуктивных форм *R. rosea* с учетом пола особей, добавляя в формулу буквенные обозначения их гендерной принадлежности: F (female) или M (male).

В связи с этим, для паспортизации нами предложены четыре высокопродуктивные формы. Это две женские с относительно более высоким накоплением двух групп веществ (F I) и уникального типа с высоким содержанием SALtot (F₁₅) и две формы мужских с уникальными генотипами, характеризовавшиеся наиболее высокими параметрами содержания двух групп веществ (M₄) и максимальным – SALtot (M₅). Данные особенности учтены при составлении генетических формул (табл. 3).

Таблица 3. Полиморфные фрагменты, уникальные для перспективных форм в популяции *Rhodiola rosea* в Республике Алтай (Усть-Канский район, окрестности села Каракол, 2023 г.)

№ особи	Пол	ГТ	Длина полиморфных фрагментов, п. н.	Содержание PPtot \geq 3%	Содержание SALtot \geq 0.3%
4	М	M ₄ *	150, 300, 310, 510, 700, 770	+	+
5	М	M ₅ *	150, 250, 300, 450, 500, 600, 810, 900	–	+
14; 18	Ф	F I	150, 230, 300, 310, 500, 550	+	+
15	Ф	F ₁₅ *	150, 300, 310, 500, 550	–	+

Обозначения: ГТ – генотип; * – уникальный генотип.

Из данных, приведенных в таблице 3, можно заключить, что у женских особей 14 и 18 выявлено высокое содержание обеих групп веществ. Таким образом, для выбранных высокопродуктивных форм *R. rosea* составлены следующие генетические формулы с использованием праймера UBC 857 и с указанием длин полиморфных фрагментов, пола и особенностей накопления БАС. Звездочкой в конце формулы обозначены уникальные генотипы:

ISSR/(UBS 857)-150,300,310,510,700,770/ M₄/PPtot+SALtot*

ISSR/(UBS 857)-150,250,300,450,500,600,810,900/ M₅/SALtot*

ISSR/(UBS 857)-150,230,300,310,500,550/ F I/PPtot+SALtot;PPtot;SALtot

ISSR/(UBS 857)-150,300,310,500,550/ F₁₅/SALtot*

Выводы

В результате изучения содержания основных групп БАС в корневищах у 19 зрелых генеративных особей *R. rosea* обнаружены высокие средние значения содержания PCtot и SALtot, а также суммы фенольных соединений (PCtot) в исследованной нами ЦП (РА, Усть-Канский район, окр. с Каракол, Бацелакский хребет). 13 особей из данной ЦП характеризовались высокими значениями PPtot и SALtot в корневищах. Обнаружена практически вдвое более высокая амплитуда изменчивости по содержанию этих групп БАС в корневищах у мужских растений, по сравнению с женскими.

Выявлены перспективные формы по содержанию PPtot и SALtot в корневищах у особей исследованной ЦП *R. rosea*, идентифицированные с помощью ISSR – маркеров (с использованием UBC 857 праймера), для которых составлены паспорта в виде генетических формул. В результате нами предложены для паспортизации две женские формы, характеризовавшиеся высоким накоплением в корневищах двух групп веществ (PPtot+SALtot) или только SALtot, одна из которых обладала уникальным генотипом. Генетические формулы также составлены для двух форм мужских особей с уникальными электрофоретическими спектрами по ISSR-маркерам, одна из которых также характеризовалась высоким содержанием обеих групп веществ, другая – только салидрозид и тирозол.

Финансирование

Работа финансировалась за счет средств бюджета государственного задания Центрального сибирского ботанического сада СО РАН «Анализ биоразнообразия, сохранение и восстановление редких и ресурсных видов растений с использованием экспериментальных методов» № АААА-А21-121011290025-2.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Zhang Y., Cai P., Cheng G., Zhang Y. A Brief Review of Phenolic Compounds Identified from Plants: Their Extraction, Analysis, and Biological Activity // Natural Product Communications. 2022. Vol. 17(1). <https://doi.org/10.1177/1934578X211069721>.
2. Sanz-Barrio P., Noreen E., Gilsanz-Estebarez L., Lorenzo-Calvo J., Martínez-Ferrán M., Pareja-Galeano H. *Rhodiola rosea* supplementation on sports performance: A systematic review of randomized controlled trials // Phytotherapy Research. 2023. Vol. 37, no. 10. Pp. 4414–4428. <https://doi.org/10.1002/ptr.7950>.

3. Tinsley G.M., Jagim A.R., Potter G.D.M., Garner D., Galpin A.J. *Rhodiola rosea* as an adaptogen to enhance exercise performance: a review of the literature // *British Journal of Nutrition*. 2024. Vol. 131(3). Pp. 461–473. <https://doi.org/10.1017/S0007114523001988>.
4. Drafi F., Bauerova K., Chrastina M., Taghdisiesfejr M., Rocha J., Direito R., Figueira M.E., Sepodes B., Ponist S. *Rhodiola rosea* L. Extract, a Known Adaptogen, Evaluated in Experimental Arthritis // *Molecules*. 2023. Vol. 28(13). 5053. <https://doi.org/10.3390/molecules28135053>.
5. Wang S., Feng Y., Zheng L., He P., Tan J., Cai J., Wu M., Ye X. Rosavin: Research Advances in Extraction and Synthesis, Pharmacological Activities and Therapeutic Effects on Diseases of the Characteristic Active Ingredients of *Rhodiola rosea* L. // *Molecules*. 2023. Vol. 28(21). 7412. <https://doi.org/10.3390/molecules28217412>.
6. Kim K.J., Jung Y.S., You D.M., Lee S.H., Lee G., Kwon K.-B., Kim D.-O. Neuroprotective effects of ethanolic extract from dry *Rhodiola rosea* L. rhizomes // *Food Science and Biotechnology*. 2021. Vol. 30(2). Pp. 287–297. <https://doi.org/10.1007/s10068-020-00868-7>.
7. Brinckmann J.A., Cunningham A.B., Harter D.E.V. Running out of time to smell the roseroots: Reviewing threats and trade in wild *Rhodiola rosea* L. // *Journal of Ethnopharmacology*. 2021. Vol. 269. 113710. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113710>.
8. Ampom-Nyarko K., Lutz S., Sloley B.D., Piquette K., Zhnag Z. Assessments of soil productivity for roseroot (*Rhodiola rosea* L.) cultivation in Alberta // *Zeitschrift für Arznei- und Gewürzpflanzen*. 2011. Vol. 16. Pp. 156–162.
9. Cuerrier A., Ampom-Nyarko K. Chapter 5. *Rhodiola rosea* Cultivation in Canada and Alaska // *Rhodiola rosea*. Boca Raton, 2014. 304 p. <https://doi.org/10.1201/b17903>.
10. Швыдков А.М., Мрясова К.П., Асминг С.В., Цветов Н.С., Николаев В.Г. Оценка перспектив выращивания *Rhodiola rosea* L. (Crassulaceae A. DC.) для нужд фармакологической и пищевой промышленности Мурманской области // *Вестник Уральской медицинской академической науки*. 2019. Т. 16, №2. С. 296–302. <https://doi.org/10.22138/2500-0918-2019-16-2-296-302>.
11. Non-detriment Finding for Roseroots/*Rhodiola rosea*/North China: DRAFT NDF case study example November 2023.
12. Korkina L.G., Kostyuk V., De Luca C., Pastore S. Plant Phenylpropanoids as Emerging Anti-Inflammatory Agents // *Mini-Reviews in Medicinal Chemistry*. 2011. Vol. 11(10). Pp. 823–835. <https://doi.org/10.2174/138955711796575489>.
13. Conrad A.O., Yu J., Staton M.E., Audergon J.-M., Roch G., Decroocq V., Knagge K., Chen H., Zhebentyayeva T., Liu Z. Association of the phenylpropanoid pathway with dormancy and adaptive trait variation in apricot (*Prunus armeniaca*) // *Tree Physiology*. 2019. Vol. 39, no. 7. Pp. 1136–1148. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpz053>.
14. Kumar K., Debnath P., Singh S., Kumar N. An Overview of Plant Phenolics and Their Involvement in Abiotic Stress Tolerance // *Stresses*. 2023. Vol. 3(3). Pp. 570–585. <https://doi.org/10.3390/stresses3030040>.
15. Лёзина А.В., Тернинко И.И., Генералова Ю.Э., Джаборова С.С. Анализ родоспецифичных фенольных соединений растений рода *Rhodiola* SPP. в сравнительном аспекте // *Химия растительного сырья*. 2022. №3. С. 187–193. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220310646>.
16. Marchev A.S., Aneva I.Y., Koycheva I.K., Georgiev M.I. Phytochemical variations of *Rhodiola rosea* L. wild-grown in Bulgaria // *Phytochemistry Letters*. 2017. Vol. 20. Pp. 386–390. <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2016.12.030>.
17. Adamczak A., Gryszczynska A., Buchwald W. Biometric and phytochemical variability of roseroot (*Rhodiola rosea* L.) from field cultivation // *Herba polonica*. 2014. Vol. 60(1). <https://doi.org/10.2478/hepo-2014-0001>.
18. Peschel W., Kump A., Horváth A., Csupor D. Age and harvest season affect the phenylpropanoid content in cultivated European *Rhodiola rosea* L. // *Industrial Crops and Products*. 2016. Vol. 83. Pp. 787–802. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.10.037>.
19. Elameen A., Kosman V.M., Thomsen M., Pozharitskaya O.N., Shikov A.N. Variability of Major Phenyletanes and Phenylpropanoids in 16-Year-Old *Rhodiola rosea* L. Clones in Norway // *Molecules*. 2020. Vol. 25(15). 3463. <https://doi.org/10.3390/molecules25153463>.
20. Erst A.A., Kotsupiy O.V., Erst A.S., Kuznetsov A.A. Individual Differences in Growth and in Accumulation of Secondary Metabolites in *Rhodiola rosea* Cultivated in Western Siberia // *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. Vol. 24(14). 11244. <https://doi.org/10.3390/ijms241411244>.
21. Magsar J., Sharkhuu A., Bączek K., Przybył J.L., Węglarz Z. Intraspecific variability of Roseroot (*Rhodiola rosea*) naturally occurring in Mongolian Altai // *Acta Horticulturae*. 2012. Vol. 955. Pp. 51–58. <https://doi.org/10.17660/Acta-Hortic.2012.955.4>.
22. Zhumagul M., Kurmanbayeva M., Kubentayev S., Kurmantayeva A., Turgumbayeva A., Nurpeissova I., Cherepkova N., Moldakaryzova A. Studies on the biological activity of different populations of the medicinal plant *Rhodiola rosea* L. (Golden root) // *Pakistan Journal of Botany*. 2023. Vol. 55(5). Pp. 1857–1865. [https://doi.org/10.30848/PJB2023-5\(33\)](https://doi.org/10.30848/PJB2023-5(33)).
23. Жданов Д.А., Рязанова Т.К., Куркин В.А., Куркина А.В., Браславский В.Б. Биотехнологические способы получения биологически активных соединений родиолы розовой (*Rhodiola rosea* L.) (обзор) // *Химия растительного сырья*. 2023. №3. С. 5–25. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230312550>.
24. Javid A., Gampe N., Gelana F., György Z. Enhancing the Accumulation of Rosavins in *Rhodiola rosea* L. Plants Grown In Vitro by Precursor Feeding // *Agronomy*. 2021. Vol. 11(12). 2531. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122531>.
25. Torrens-Spence M.P., Pluskal T., Li F.-S., Carballo V., Weng J.-K. Complete Pathway Elucidation and Heterologous Reconstitution of *Rhodiola* Salidroside Biosynthesis // *Molecular Plant*. 2018. Vol. 11(1). Pp. 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2017.12.007>.

26. Hussain H., Nisar M. Assessment of plant genetic variations using molecular markers: A review // Journal of Applied Biology & Biotechnology. 2020. Vol. 8(05). Pp. 99–109. <https://doi.org/10.7324/JABB.2020.80514>.
27. Kotsupiy O.V., Achimova A.A., Zhmud E.V., Williams N., Kuban I.N., Dorogina O.V., Khramova E.P. Secondary metabolites in rhizomes of wild *Rhodiola rosea* representatives from various ecological and geographical conditions in the Altai Mountains // Biochemical Systematics and Ecology. 2024. Vol. 116. 104860. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2024.104860>.
28. Набиева А.Ю., Жмудь Е.В., Кубан И.Н., Дорогина О.В. Морфометрический и молекулярный анализ популяции *Cypripedium × ventricosum* (Orchidaceae) в Новосибирской области // Ботанический журнал. 2020. Т. 105, №6. С. 78–85. <https://doi.org/10.31857/S0006813620060058>.
29. Жмудь Е.В., Кубан И.Н., Ачимова А.А., Папина О.Н., Дорогина О.В. Изменчивость морфометрических признаков и генетическая дифференциация по ISSR-маркерам *Adonis villosa* Ledeb. (Ranunculaceae) в Республике Алтай // Сибирский экологический журнал. 2024. №4. С. 635–645. <https://doi.org/10.15372/SEJ20240410>.
30. Dorogina O.V., Kuban I.N., Achimova A.A., Williams N., Lashchinsky N.N., Zhmud E.V. Morphometric Characteristics and Genetic Issr Marker Variability in *Rhodiola rosea* L. (Crassulaceae) in Different Ecological and Geographic Conditions in the Altai Republic // International Journal of Molecular Sciences. 2023. Vol. 24. 15224. <https://doi.org/10.3390/ijms242015224>.
31. Liang Z.-X., Zhang J.-Z., Sunb M.-Y., Zhang Y.-L., Zhang X.-H., Li H., Shi L. Variation of Phenolic Compounds and Antioxidant Capacities in Different Organs of *Lilium pumilum* // Natural Product Communications. 2018. Vol. 13(6). Pp. 717–722. <https://doi.org/10.1177/1934578X1801300616>.
32. Tasheva K., Dimitrova M., Lazarova M., Kosturkova G. Production of the Phenols Salidroside and Rosavins in *Rhodiola rosea* Regenerants *Ex Vitro* Adapted to Natural Conditions // Proceedings of the Bulgarian Academy of Sciences. 2023. Vol. 76(9). <https://doi.org/10.7546/CRABS.2023.09.06>.
33. Новикова А.А., Шейкина О.В., Новиков П.С., Доронина Г.У. Оценка возможности применения ISSR-маркеров для систематизации и генетической паспортизации растений рода *Rhododendron* // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. №82. С. 79–89.

Поступила в редакцию 17 сентября 2024 г.

После переработки 5 ноября 2024 г.

Принята к публикации 19 марта 2025 г.

Zhmud E.V.^{1*}, Kotsupiy O.V.¹, Kuban I.N.¹, Achimova A.A.², Khramova E.P.¹, Kabanov A.V.³, Dorogina O.V.¹
INDIVIDUAL VARIABILITY OF THE CONTENT OF BIOLOGICALLY ACTIVE COMPOUNDS AND IDENTIFICATION
BY ISSR MARKERS IN *RHODIOLA ROSEA* (CRASSULACEAE) IN THE ALTAI REPUBLIC

¹ Central Siberian Botanical Garden SB RAS, Zolotodolinskaya st., 101, Novosibirsk. 630090, Russia,
elenazhmu@gmail.com

² Gorno-Altai Botanical Garden – branch of the Central Siberian Botanical Garden SB RAS, Chisty Lug, Kamlak, Altai
Republic, 649218, Russia

³ Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, Botanicheskaya st., 4, Moscow, 127276, Russia

Individual variability in the content of two main groups of biologically active compounds (BAC) – phenylpropanoids (PPTot) and phenylethanoids (SALTot) and the molecular genetic structure by ISSR markers in 19 individuals in the *Rhodiola rosea* L. cenopopulation (CP) in the Altai Republic was studied. In this CP, 11 types of spectra were identified: I (in 6 individuals), II (in 3 individuals), III (in 2 individuals) and original (in 8 individuals). In 70% of males, 7 original spectra by ISSR markers were detected. Of the 5 analyzed primers, the most informative one was UBC 857. With its primer, specific amplified DNA fragments were obtained in individuals of this species and forms with a relatively higher content of the two most significant BAC groups were certified. High content of PPTot (more than 3% in air-dried raw material) was found in 30% of male and 44% of female individuals in this CP, and SALTot (more than 0.3%, which is higher than the average value for the CP) was found in 40% of male and 70% of female individuals. Based on the obtained results, we recommend four forms of *R. rosea* as promising highly productive sources of biologically active substances in vitro and for cultivation in introduction. These are individuals with two types of spectra and a high content of one or both groups of substances (female) and with two unique types of spectra and a high content of PPTot+SALTot and SALTot (male).

Keywords: rare species, genetic diversity, gender differentiation, markers, content of phenylpropanoids and phenylethanoids, certification of highly productive forms

For citing: Zhmud E.V., Kotsupiy O.V., Kuban I.N., Achimova A.A., Khramova E.P., Kabanov A.V., Dorogina O.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2025, no. 2, pp. 215–225. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250215773>.

* Corresponding author.

References

1. Zhang Y., Cai P., Cheng G., Zhang Y. *Natural Product Communications*, 2022, vol. 17(1). <https://doi.org/10.1177/1934578X211069721>.
2. Sanz-Barrio P., Noreen E., Gilsanz-Esteban L., Lorenzo-Calvo J., Martínez-Ferrán M., Pareja-Galeano H. *Phytotherapy Research*, 2023, vol. 37, no. 10, pp. 4414–4428. <https://doi.org/10.1002/ptr.7950>.
3. Tinsley G.M., Jagim A.R., Potter G.D.M., Garner D., Galpin A.J. *British Journal of Nutrition*, 2024, vol. 131(3), pp. 461–473. <https://doi.org/10.1017/S0007114523001988>.
4. Drafi F., Bauerova K., Chrastina M., Taghdisiesfejr M., Rocha J., Direito R., Figueira M.E., Sepodes B., Ponist S. *Molecules*, 2023, vol. 28(13), 5053. <https://doi.org/10.3390/molecules28135053>.
5. Wang S., Feng Y., Zheng L., He P., Tan J., Cai J., Wu M., Ye X. *Molecules*, 2023, vol. 28(21), 7412. <https://doi.org/10.3390/molecules28217412>.
6. Kim K.J., Jung Y.S., You D.M., Lee S.H., Lee G., Kwon K.-B., Kim D.-O. *Food Science and Biotechnology*, 2021, vol. 30(2), pp. 287–297. <https://doi.org/10.1007/s10068-020-00868-7>.
7. Brinckmann J.A., Cunningham A.B., Harter D.E.V. *Journal of Ethnopharmacology*, 2021, vol. 269, 113710. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113710>.
8. Ampong-Nyarko K., Lutz S., Sloley B.D., Piquette K., Zhnag Z. *Zeitschrift für Arznei- und Gewürzpflanzen*, 2011, vol. 16, pp. 156–162.
9. Cuerrier A., Ampong-Nyarko K. *Rhodiola rosea*. Boca Raton, 2014, 304 p. <https://doi.org/10.1201/b17903>.
10. Shvydkov A.M., Mryasova K.P., Asming S.V., Tsvetov N.S., Nikolayev V.G. *Vestnik Ural'skoy meditsinskoy akademicheskoy nauki*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 296–302. <https://doi.org/10.22138/2500-0918-2019-16-2-296-302>. (in Russ.).
11. *Non-detriment Finding for Roseroots/Rhodiola rosea/North China: DRAFT NDF case study example November 2023*.
12. Korkina L.G., Kostyuk V., De Luca C., Pastore S. *Mini-Reviews in Medicinal Chemistry*, 2011, vol. 11(10), pp. 823–835. <https://doi.org/10.2174/138955711796575489>.
13. Conrad A.O., Yu J., Staton M.E., Audergon J.-M., Roch G., Decroocq V., Knagge K., Chen H., Zhebentyayeva T., Liu Z. *Tree Physiology*, 2019, vol. 39, no. 7, pp. 1136–1148. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpz053>.
14. Kumar K., Debnath P., Singh S., Kumar N. *Stresses*, 2023, vol. 3(3), pp. 570–585. <https://doi.org/10.3390/stresses3030040>.
15. Lozina A.V., Terninko I.I., Generalova Yu.E., Dzhaborova S.S. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2022, no. 3, pp. 187–193. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220310646>. (in Russ.).
16. Marchev A.S., Aneva I.Y., Koycheva I.K., Georgiev M.I. *Phytochemistry Letters*, 2017, vol. 20, pp. 386–390. <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2016.12.030>.
17. Adamczak A., Gryszczyńska A., Buchwald W. *Herba polonica*, 2014, vol. 60(1). <https://doi.org/10.2478/hepo-2014-0001>.
18. Peschel W., Kump A., Horváth A., Csutor D. *Industrial Crops and Products*, 2016, vol. 83, pp. 787–802. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.10.037>.
19. Elameen A., Kosman V.M., Thomsen M., Pozharitskaya O.N., Shikov A.N. *Molecules*, 2020, vol. 25(15), 3463. <https://doi.org/10.3390/molecules25153463>.
20. Erst A.A., Kotsupiy O.V., Erst A.S., Kuznetsov A.A. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, vol. 24(14), 11244. <https://doi.org/10.3390/ijms241411244>.
21. Magsar J., Sharkhuu A., Bączek K., Przybył J.L., Węglarz Z. *Acta Horticulturae*, 2012, vol. 955, pp. 51–58. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.955.4>.
22. Zhumagul M., Kurmanbayeva M., Kubentayev S., Kurmantayeva A., Turgumbayeva A., Nurpeissova I., Cherepkova N., Moldakaryzova A. *Pakistan Journal of Botany*, 2023, vol. 55(5), pp. 1857–1865. [https://doi.org/10.30848/PJB2023-5\(33\)](https://doi.org/10.30848/PJB2023-5(33)).
23. Zhdanov D.A., Ryazanova T.K., Kurkin V.A., Kurkina A.V., Braslavskiy V.B. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2023, no. 3, pp. 5–25. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230312550>. (in Russ.).
24. Javid A., Gampe N., Gelana F., György Z. *Agronomy*, 2021, vol. 11(12), 2531. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122531>.
25. Torrens-Spence M.P., Pluskal T., Li F.-S., Carballo V., Weng J.-K. *Molecular Plant*, 2018, vol. 11(1), pp. 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2017.12.007>.
26. Hussain H., Nisar M. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 2020, vol. 8(05), pp. 99–109. <https://doi.org/10.7324/JABB.2020.80514>.
27. Kotsupiy O.V., Achimova A.A., Zhmud E.V., Williams N., Kuban I.N., Dorogina O.V., Khranova E.P. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2024, vol. 116, 104860. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2024.104860>.
28. Nabyeva A.YU., Zhmud' Ye.V., Kuban I.N., Dorogina O.V. *Botanicheskiy zhurnal*, 2020, vol. 105, no. 6, pp. 78–85. <https://doi.org/10.31857/S0006813620060058>. (in Russ.).
29. Zhmud' Ye.V., Kuban I.N., Achimova A.A., Papina O.N., Dorogina O.V. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*, 2024, no. 4, pp. 635–645. <https://doi.org/10.15372/SEJ20240410>. (in Russ.).
30. Dorogina O.V., Kuban I.N., Achimova A.A., Williams N., Lashchinskiy N.N., Zhmud E.V. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, vol. 24, 15224. <https://doi.org/10.3390/ijms242015224>.

31. Liang Z.-X., Zhang J.-Z., Sunb M.-Y., Zhang Y.-L., Zhang X.-H., Li H., Shi L. *Natural Product Communications*, 2018, vol. 13(6), pp. 717–722. <https://doi.org/10.1177/1934578X1801300616>.
32. Tasheva K., Dimitrova M., Lazarova M., Kosturkova G. *Proceedings of the Bulgarian Academy of Sciences*, 2023, vol. 76(9). <https://doi.org/10.7546/CRABS.2023.09.06>.
33. Novikova A.A., Sheykina O.V., Novikov P.S., Doronina G.U. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2012, no. 82, pp. 79–89. (in Russ.).

Received September 17, 2024

Revised November 5, 2024

Accepted March 19, 2025

Сведения об авторах

Жмудь Елена Викторовна – доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории редких и исчезающих видов растений, elenazhmu@gmail.com

Коцупий Ольга Викторовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории фитохимии, olnevaster@gmail.com

Кубан Ирина Николаевна – научный сотрудник лаборатории редких и исчезающих видов растений, irinakuban@gmail.com

Ачимова Алтынай Алексеевна – кандидат биологических наук, доцент, директор, altynayachimova@gmail.com

Храмова Елена Петровна – доктор биологических наук, заведующая лабораторией фитохимии, elenakhramova2023@yandex.ru

Кабанов Александр Владимирович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией декоративных растений, alex.kabanow@rambler.ru

Дорогина Ольга Викторовна – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующая лабораторией редких и исчезающих видов растений, olga-dorogina@yandex.ru

Information about authors

Zhmud Elena Viktorovna – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Rare and Endangered Plant Species, elenazhmu@gmail.com

Kotsupiy Olga Viktorovna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Phytochemistry, olnevaster@gmail.com

Kuban Irina Nikolaevna – Researcher of the Laboratory of Rare and Endangered Plant Species, irinakuban@gmail.com

Achimova Altynay Alekseevna – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Director, altynayachimova@gmail.com

Khramova Elena Petrovna – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Phytochemistry, elenakhramova2023@yandex.ru

Kabanov Alexander Vladimirovich – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Head of the Laboratory of Ornamental Plants, alex.kabanow@rambler.ru

Dorogina Olga Viktorovna – Doctor of Biological Sciences, Professor, Chief Researcher, Head of the Laboratory of laboratory of rare and endangered plant species, olga-dorogina@yandex.ru