

Фотосинтетические пигменты и фенольный потенциал родиолы розовой (*Rhodiola rosea* L.) различных эколого-географических популяций

И. Ю. Сергеева*^{ORCID}, А. В. Заушинцена^{ORCID}, Е. Н. Брюхачев^{ORCID}



Дата поступления в редакцию: 12.08.2020
Дата принятия в печать: 28.08.2020

ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»,
650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6

*e-mail: sergeeva.76@list.ru



© И. Ю. Сергеева, А. В. Заушинцена, Е. Н. Брюхачев, 2020

Аннотация.

Введение. Растительные фенольные соединения и пигменты оказывают противовоспалительное, иммуномодулирующее, антиоксидантное и адаптогенное действие. Цель исследований – изучение качественного и количественного содержания биологически активных соединений родиолы розовой (*Rhodiola rosea* L.) различных популяций.

Объекты и методы исследования. Три популяции родиолы розовой. Определение биологически активных веществ (БАВ) осуществляли методами высокоэффективной жидкостной (ВЭЖХ) и тонкослойной (ТСХ) хроматографии, фотосинтетических пигментов – спектрофотометрическим методом. Статистический анализ результатов выполнен с помощью программного обеспечения Statistica 6.0.

Результаты и их обсуждение. В ходе исследований идентифицировано 12 БАВ популяции родиолы розовой из Горного Алтая. В корневищах с корнями установлено максимальное содержание (мг/г) розеина ($20,45 \pm 3,46$) и салидрозида ($28,16 \pm 2,27$); в надземной части растения: астрагалина ($38,94 \pm 2,21$); трицин-5-О-β-D-глюкопиранозида ($35,25 \pm 1,66$); трицин-7-О-β-D-глюкопиранозида ($30,23 \pm 1,45$); тирозола ($21,80 \pm 1,21$). Идентифицировано 5 БАВ из популяции Кузнецкого Алатау с максимальным содержанием (мг/г) в корневищах с корнями розавина ($16,89 \pm 2,11$) и салидрозида ($14,35 \pm 2,52$). Идентифицировано 6 БАВ из популяции Тункинских хребтов Бурятии с максимальным содержанием (мг/г) в корневищах с корнями розавина ($20,72 \pm 2,11$), метилгаллата ($39,00 \pm 1,05$) и коричневого альдегида ($10,15 \pm 1,93$). В надземной биомассе родиолы розовой изучаемых популяций накапливается порядка 0,333 мг/г хлорофиллов. При этом каротиноидов синтезируется 0,109 мг/г по трем популяциям. Установлены коэффициенты корреляции между содержанием фотосинтетических компонентов с морфометрическими признаками. Обнаружены две положительно высоких зависимости: по содержанию каротиноидов и числа листьев ($r = 0,89 \pm 0,09$) и по содержанию каротиноидов и длины побега ($r = 0,96 \pm 0,22$).

Выводы. Показана возможность извлечения фотосинтетических пигментов из надземной биомассы родиолы розовой для целевого использования в пищевых технологиях.

Ключевые слова. Родиола розовая (*Rhodiola rosea* L.), биологически активные вещества, фенольные соединения, хлорофиллы, каротиноиды

Финансирование. Работа выполнена в рамках соглашения № 075-02-2018-223 с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России) от 26.11.2018 (№ 075-15-2019-1362 от 14.06.2019).

Для цитирования: Сергеева, И. Ю. Фотосинтетические пигменты и фенольный потенциал родиолы розовой (*Rhodiola rosea* L.) различных эколого-географических популяций / И. Ю. Сергеева, А. В. Заушинцена, Е. Н. Брюхачев // Техника и технология пищевых производств. – 2020. – Т. 50, № 3. – С. 393–403. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-3-393-403>.

Original article

Available online at <http://fppt.ru/eng>

Photosynthetic pigments and phenolic potential of *Rhodiola rosea* L. from plant communities of different ecology and geography

Irina Yu. Sergeeva*^{ORCID}, Alexandra V. Zaushintsena^{ORCID}, Evgeniy N. Bryukhachev^{ORCID}

Received: August 12, 2020
Accepted: August 28, 2020

Kemerovo State University,
6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia

*e-mail: sergeeva.76@list.ru



Abstract.

Introduction. Longitudinal studies of human activity and metabolism revealed various anti-inflammatory, immunomodulatory, anti-stress, antioxidant, and adaptogenic properties of such secondary plant metabolites as phenolic compounds and pigments. Human cells cannot synthesize these compounds. Therefore, food biotechnology requires new data on the photosynthetic potential of plants with good functional prospects. The research objective was to study the qualitative and quantitative profile of biologically active compounds of *Rhodiola rosea* L. harvested from various plant communities in order to define the potential of their extracts and minor compounds for food technologies.

Study objects and methods. The research featured three communities of *Rhodiola rosea* L. originally located in ecologically and geographically different habitats. They were introduced into Kuzbass from the Kuznetsk Alatau, Gorny Altai, and the Tunka alpine tundra belt in Buryatia. The experiment began in 2018, when the rhizomes were dissected into equal shares of 40–42 g and placed in a medicinal plant nursery. The methods of high-performance liquid (HPLC) and thin-layer (TLC) chromatography were used to study the biologically active substances in the plant biomass. The photosynthetic pigments were detected using the spectrophotometric method. The obtained data underwent a statistical analysis based on Statistica 6.0 software.

Results and discussion. The sample from the Gorny Altai community revealed twelve biologically active substances. Its rhizomes appeared rich in gallic acid with the maximum content (mg/g) of 10.26 ± 2.31 , rosein (20.45 ± 3.46), daphneticin (13.80 ± 2.30), and salidroside (28.16 ± 2.27). The tops demonstrated the maximum content (mg/g) of astragaline (38.94 ± 2.21), tricine (13.07 ± 0.72), tricine-5-O- β -D-glucopyranoside (35.25 ± 1.66), tricine-7-O- β -D-glucopyranoside (30.23 ± 1.45), and tyrosol (21.80 ± 1.21). The Kuznetsk Alatau sample proved to possess five biologically active substances. Its rhizomes had the maximum content (mg/g) of rosavin (16.89 ± 2.11) and salidroside (14.35 ± 2.52). The sample obtained from the Tunka ridge in Buryatia had six biologically active substances with the maximum content (mg/g) of rosavin (20.72 ± 2.11), methylgalate (39.00 ± 1.05), and cinnamaldehyde (10.15 ± 1.93) in the rhizomes. The top biomass of *Rhodiola rosea* L. accumulated about 0.333 mg/g of chlorophylls and synthesized 0.109 mg/g of carotenoids on average. The research established the correlation coefficients between the content of photosynthetic components with morphometric characteristics, including two positive dependences between the content of carotenoids and the number of leaves ($r = 0.89 \pm 0.09$) and the content of carotenoids and shoot length ($r = 0.96 \pm 0.22$).

Conclusion. The samples of *Rhodiola rosea* L. demonstrated a good biotechnological potential for medicine and food industry. The Kuznetsk Alatau plant community proved rich in rosavin, salidroside, and methyl gallate. The Gorny Altai samples revealed high content of salidroside, gallic acid, daphnetitsin, and rosein. The Tunka samples appeared to synthesize a lot of methyl gallate, rosavin, and cinnamaldehyde. In addition, the top biomass of the Altai sample proved rich in tricine and its derivatives, astragaline and tyrosol. The research also established the possibility of commercial extraction of photosynthetic pigments from the top biomass of *Rhodiola rosea* L. for functional food production.

Keywords. *Rhodiola rosea* L., biologically active substances, phenolic compounds, chlorophylls, carotenoids

Funding. The research is part of agreement No. 075-02-2018-223 dated November 26, 2018, with the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Minobrnauka) (No. 075-15-2019-1362 dated June 14, 2019).

For citation: Sergeeva IYu, Zaushintsena AV, Bryukhachev EN. Photosynthetic pigments and phenolic potential of *Rhodiola rosea* L. from plant communities of different ecology and geography. Food Processing: Techniques and Technology. 2020;50(3):393–403. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-3-393-403>.

Введение

Вторичные метаболиты имеют существенное значение для развития растений. Из класса фенольных соединений в большей мере известны: простейшие фенольные соединения, оксибензойные кислоты, фенилпропаноиды и флавоноиды. Они участвуют во многих процессах роста и развития растений. Например, в пигментации, в сигнальных и репродуктивных функциях. Есть предположения, что они могут регулировать клеточное деление. Фенольные соединения защищают растения от различных неблагоприятных факторов окружающей среды [1, 2].

В клетках животных и человека данные соединения не синтезируются. Их присутствие в тканях зависит от потребления в пищу растительных продуктов. Доказано, что смертность от инфаркта миокарда, онкологических и ряда других

заболеваний характеризуется обратной корреляцией с потреблением флавоноидов [2–5].

Пищевые волокна дифференцированно влияют на выработку фенольных кислот из рутина в модели ферментации *in vitro* микробиоты кишечника человека. Доказано, что полифенолы усваиваются вместе с пищевыми волокнами. Они оба катаболизируются кишечной микробиотой и могут влиять на нее. Однако взаимодействие между ними и воздействие на их результирующие микробные продукты в настоящее время изучено не в полной мере. Взаимодействие между волокном и фенолами изменяет производство фенольных кислот и может стать ключевым фактором в повышении пользы для здоровья человека [6].

Ассоциация привычного потребления кофе с более низким риском заболеваний, таких как сахарный диабет 2 типа, хронические заболевания

печени, некоторые виды рака или снижение смертности, была подтверждена в проспективных когортных исследованиях во многих регионах мира. Молекулярный механизм до сих пор не выяснен. Радикально-очищающая и противовоспалительная активность кофейных компонентов слишком слаба, чтобы объяснить такие эффекты. Н. Kolb с соавторами утверждают, что кофе как растительная пища обладает полезными свойствами овощей и фруктов [7]. Недавние исследования выявили механизм укрепления здоровья общий для кофе, овощей и фруктов. Это активация адаптивного клеточного ответа, характеризующегося повышением регуляции белков, участвующих в защите клеток, в частности антиоксидантных, детоксицирующих и восстанавливающих ферментов. Ключом к этому ответу является активация системы Nrf2 (Nuclear factor erythroid 2-related factor-2) фенольными фитохимическими веществами, которая индуцирует экспрессию генов клеточной защиты. Кофе играет доминирующую роль в этом отношении, поскольку является основным диетическим источником фенольных кислот и полифенолов в развитых странах мира. Поддерживающим действием может быть модуляция микробиоты кишечника непереваженными пребиотическими компонентами кофе, но имеющиеся данные все еще скудны. Исследователи пришли к выводу, что кофе использует те же пути укрепления здоровья, что и другие овощи и фрукты. Кофейные зерна можно рассматривать как здоровую растительную пищу и основного поставщика пищевых фенольных фитохимикатов [7].

Метабомика – это мощный инструмент для исследования взаимодействий между питанием, питательными веществами и метаболизмом человека. *Ecklonia cava* – съедобная коричневая водоросль, которая встречается в Корее и Японии и содержит уникальные полифенолы, называемые флоротанинами. В исследованиях метаболомного профилирования J. Kim с соавторами показано, что уровни рибофлавина, уркановой кислоты, 5-гидрокси-6-метоксииндола глюкуроноида и гуанидино валериановой кислоты были значительно повышены в группе приема сеаполинола по сравнению с группой плацебо [8]. Для выявления связи между уровнями метаболитов и клиническими характеристиками, связанными с жировыми отложениями, был проведен корреляционный анализ. Среди метаболитов, концентрация которых изменялась в группе потребления сеаполинола, рибофлавин был связан с индексом массы тела, массой тела, жировой массой и процентом жира в организме. Эти данные свидетельствуют о том, что снижение жировых отложений, вызванное приемом сеаполинола, связано с усилением антиоксидантного эффекта рибофлавина [8].

Ученые стали активно изучать родиолу розовую (*Rhodiola rosea* L.) с конца 50-х начала 60-х гг. прошлого столетия. В результате многолетних

исследований установлены противовоспалительные, иммуномодулирующие, антистрессовые, антиоксидантные, адаптогенные и другие положительные свойства данного вида [9, 10, 14].

Наиболее известным фенолоспиртом родиолы розовой является п-оксифенилэтанол – агликон гликозида салидрозид. Он является активным действующим веществом. В корневищах родиолы розовой накапливается достаточное количество салидрозидов [11]. Они оказывают противовоспалительное воздействие через производство цитокинов. Также предупреждают поражение клеток внутренних органов при гипоксии и ишемии и используются в качестве антиастматического средства [11]. Вещества группы фенилпропаноидов родиолы розовой (розавин, розарин, розин) имеют тонизирующий, ноотропный и седативный эффект при использовании в лечебных целях [9, 13].

Флавоны трицина, содержащиеся в наземной части родиолы розовой, могут блокировать свободные радикалы и положительно влиять на восстановление внутриклеточной структуры, замедлять процессы старения. Их полезно принимать в зоне радиоактивного излучения [2, 9]. Тирозол активно применяется для лечения фибрилляции предсердий при субклиническом тиреотоксикозе. Он приводит к уменьшению объема щитовидной железы, увеличивает уровень тиреотропного гормона, необходимого для оптимизации ее функций [13]. Астрагалин как сильный антиоксидант может купировать воспалительные процессы в организме, ингибировать рост злокачественных опухолей, восстанавливать поврежденные клетки головного мозга, очищать кровеносные сосуды и укреплять костную ткань. Следовательно, наземная часть родиолы розовой обладает совсем иными, но также уникальными свойствами, и может быть пригодна для приготовления различных напитков для профилактики и предупреждения сердечно-сосудистых заболеваний и онкологии [9].

В последние годы активно развиваются исследования по фотодинамической терапии [15, 16]. Они основаны на использовании двух групп пигментов: хлорофиллов и каротиноидов. Их производные могут проявлять антибактериальные, антиоксидантные и даже противораковые свойства. По данным института питания, уровень β-каротина в плазме крови у большинства населения нашей страны снижен в 2 раза по сравнению с населением зарубежных стран. Это приводит к риску развития разных форм рака. Так, ученые подтвердили ингибирование опухоли, а при удвоении дозы – полную гибель клеток, при введении β-каротина в дозе 6,25 мг/л [17]. Пополнить фонд витаминов в организме можно путем введения в рацион овощей и фруктов ярко-желтого и оранжевого цвета

(морковь, картофель с желтой и оранжевой окраской мякоти, абрикосы, некоторые виды дынь и тыквы), которые содержат около 80 % провитамина А в форме β-каротина. Витамин А участвует в синтезе стероидных гормонов (в том числе прогестерона), сперматогенезе, является антагонистом гормона щитовидной железы – тироксина [17].

Следовательно, в практике пищевых биотехнологий характеристика фотосинтетического потенциала растений, планируемых для введения в новый функциональный продукт, весьма актуальна.

Объекты и методы исследования

Объектами исследований стали три интродуцированные в Кузбасс эколого-географически отдаленные популяции родиолы розовой (*Rhodiola rosea* L.): из Кузнецкого Алатау, Горного Алтая и Тункинских гольцов Бурятии. В 2018 г. корневища каждого растения расчленены на одинаковые по массе доли (40–42 г) и помещены в питомник лекарственных растений.

Определение морфометрических показателей растений. Линейные параметры побегов и листьев у родиолы розовой измеряли штангенциркулем.

Определение фотосинтетических пигментов. Содержание пигментов в надземной биомассе растений осуществляли с использованием спектрофотометра марки Jenway 6305 UV/VIS по методике, изложенной в [18].

Определение фенольных соединений. Определение биологически активных веществ в биомассе родиолы розовой осуществляли методами высокоэффективной жидкостной (ВЭЖХ) и тонкослойной (ТСХ) хроматографии. Подготовку проб и идентификацию веществ проводили по методике, описанной в [18].

Количественный анализ исследуемых вторичных метаболитов (флавонов) определяли с помощью калибровочных кривых, построенных в диапазоне концентраций 1,9–235 мкг/мл [20, 21].

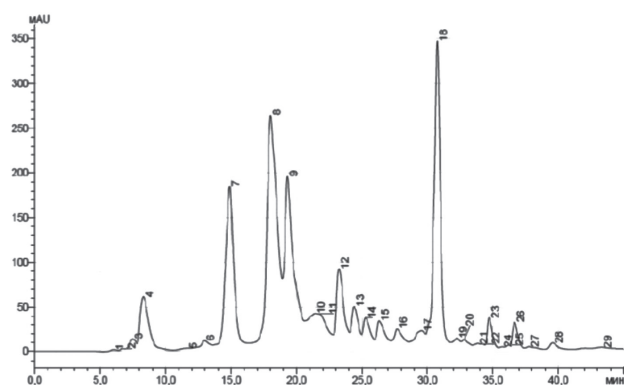


Рисунок 1. Хроматограмма этанольного извлечения фенолов из корневища и корней родиолы розовой (*Rhodiola rosea* L.) в популяции Горного Алтая

Figure 1. Chromatogram of ethanol extraction of phenols from the rhizome and roots of *Rhodiola rosea* L. (Gorny Altai)

Статистическая обработка результатов исследования. Все эксперименты проведены в трех-четыре кратной повторности. Данные представлены по среднему значению показателей и стандартному отклонению. Статистический анализ результатов выполнен с помощью однофакторного дисперсионного анализа с использованием программного обеспечения Statistica 6.0.

Результаты и их обсуждение

Идентифицированные биологически активные вещества в корневищах с корнями в популяции родиолы розовой (*Rhodiola rosea* L.) Горного Алтая представлены на рисунке 1 и в таблице 1.

Хроматографический профиль отражает преобладающее количество салидрозид (пик 18). На 20,4 % и 63,6 % меньше содержание розеина и галловой кислоты. Малое количество розавина, который отвечает за антифунгицидные, антимикробные,

Таблица 1. Содержание фенольных соединений в корневищах и корнях родиолы розовой (*Rhodiola rosea* L.) из популяции Горного Алтая

Table 1. Content of phenolic compounds in the rhizomes and roots of *Rhodiola rosea* L. (Gorny Altai)

Компонент	Время удерживания, сек	Номер пика хроматограммы	Количественное содержание, мг/г
Триандрин	497,64	4	4,85 ± 0,98
Гербацетин	777,66	6	0,42 ± 0,05
Галловая кислота	892,92	7	10,26 ± 2,31
Розеин	1080,60	8	20,45 ± 3,46
Дафнетицин	1158,42	9	13,8 ± 2,30
Плантамайозид	1284,60	10	2,74 ± 0,25
Розарин	1303,68	11	2,47 ± 0,25
Сирингин	1394,00	12	4,86 ± 0,86
Кемпферол	1463,00	13	2,20 ± 0,23
Розавин	1516,00	14	1,63 ± 0,16
Гербацитин	1661,19	16	1,13 ± 0,12
Салидрозид	2205,12	18	28,16 ± 2,27

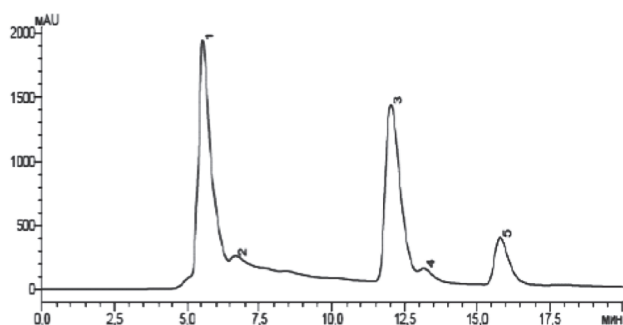


Рисунок 2. Хроматограмма этанольного извлечения фенолов из корневища и корней родиолы розовой (*Rhodiola rosea* L.) в популяции Кузнецкого Алатау

Figure 2. Chromatogram of ethanol extraction of phenols from the rhizome and roots of *Rhodiola rosea* L. (Kuznetsk Alatau)

антиоксидантные и другие функции. Из 12 идентифицированных БАВ от 5 до 10 % в общем объеме занимают триандрин, розарин и сиригин, более 10 % – дафнетицин, розеин, галловая кислота и салидрозид.

В популяции из Кузнецкого Алатау выделено 5 выраженных пиков на хроматограмме (рис. 2). Они соответствуют таким важным для медицинского и пищевого использования биологически активным веществам, как розавин, салидрозид, розин, розарин и метилгаллат (табл. 2).

Полученные результаты свидетельствуют о существенном накоплении розавина в корневищах с корнями исследуемой популяции. Его количественное содержание находится на уровне 37 % от общего числа идентифицированных фенолов.

Таблица 2. Содержание фенольных соединений в корневищах и корнях родиолы розовой (*Rhodiola rosea* L.) из популяции Кузнецкого Алатау

Table 2. Content of phenolic compounds in the rhizomes and roots of *Rhodiola rosea* L. (Kuznetsk Alatau)

Компонент	Время удерживания, сек	Номер пика хроматограммы	Количественное содержание, мг/г
Розавин	721,80	1	16,89 ± 2,11
Салидрозид	354,12	3	14,35 ± 2,52
Розин	780,23	2	5,04 ± 0,93
Розарин	1331,65	4	2,01 ± 0,37
Метилгаллат	732,25	5	6,80 ± 1,05

Таблица 3. Содержание фенольных соединений в корневищах и корнях родиолы розовой (*Rhodiola rosea* L.) из популяции Тункинских хребтов Бурятии

Table 3. Content of phenolic compounds in the rhizomes and roots of *Rhodiola rosea* L. (Tunka ridge, Buryatia)

Компонент	Время удержания, сек	Номер пика хроматограммы	Количественное содержание, мг/г
Метилгаллат	97,2	1	39,00 ± 1,05
Салидрозид	133,8	11	1,82 ± 2,52
Коричный альдегид	318,6	5	10,15 ± 1,93
Розавин	652,8	9	20,72 ± 2,11
Розарин	725,4	6	1,59 ± 0,37
Розин	975,6	2	6,39 ± 0,93

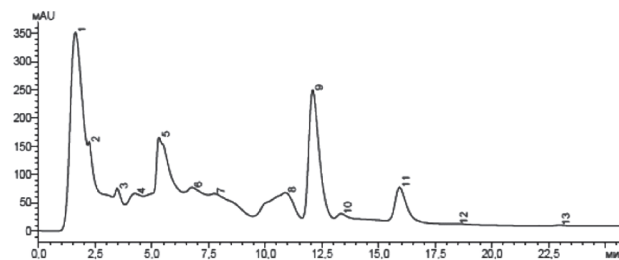


Рисунок 3. Хроматограмма этанольного извлечения фенолов из корневища и корней родиолы розовой (*Rhodiola rosea* L.) в популяции Тункинских хребтов Бурятии

Figure 3. Chromatogram of ethanol extraction of phenols from the rhizome and roots of *Rhodiola rosea* L. (Tunka ridge, Buryatia)

Существенную долю (32 %) в структуре БАВ родиолы розовой из популяции Кузнецкого Алатау занимает салидрозид. На такие важные компоненты, как розарин, розин и метилгаллат, приходится около 1/3 от общего объема.

В исследуемом виде родиолы розовой самого географически удаленного местообитания (Тункинские хребты, Бурятия) наблюдается схожий с предыдущим образцом растения состав фитохимических компонентов как по численности, так и по фактическим значениям в отношении некоторых БАВ (рис. 3, табл. 3).

Показано, что почти половина от суммы идентифицированных биологически активных веществ родиолы розовой данной популяции приходится на долю метилгаллата. В корневищах с корнями установлено значительное содержание розавина и коричневого альдегида. Меньше всего

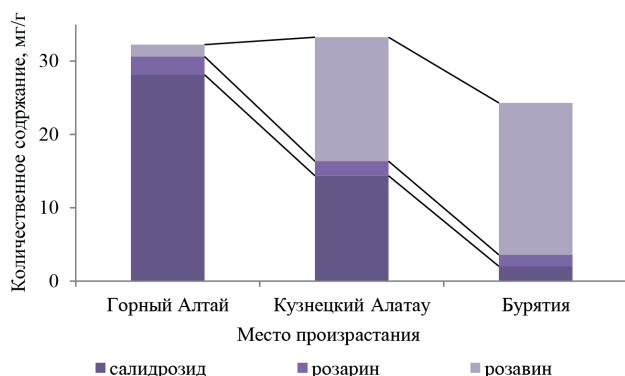


Рисунок 4. Количественное содержание БАВ по сумме трех равно обнаруженных и идентифицированных в корневище с корнями исследуемых популяций родиолы розовой (*Rhodiola rosea* L.)

Figure 4. Quantitative content of biologically active substances in the rhizome and roots of the three samples of *Rhodiola rosea* L.

в популяции этой эколого-географической зоны сформировано салидрозида. Отличительной особенностью данной популяции родиолы розовой является наличие коричневого альдегида.

Сравнительная оценка количественного содержания по сумме трех одинаково обнаруженных и идентифицированных в корневище с корнями трех популяций родиолы розовой (рис. 4) показала, что максимальное накопление салидрозида отмечено в популяции родиолы розовой, районированной в Горном Алтае. При этом в результате вторичного метаболизма в популяциях растения Кузнецкого Алатау и Бурятии синтезируется соизмеримое количество розавина.

Вследствие обнаружения большого спектра БАВ в корневище с корнями популяции родиолы розовой Горного Алтая исследовали надземную биомассу этой популяции (рис. 5, табл. 4). Выявлено высокое накопление пяти фитохимических соединений.

Установлено, что на долю трицина и его производных приходится более половины (56,6 %) от всего объема идентифицированных БАВ. Почти третью часть (27,9 %) занимает астрагалин, 15,6 % – тирозол.

Таблица 4. Содержание фенольных соединений в надземной биомассе родиолы розовой (*Rhodiola rosea* L.) из популяции Горного Алтая

Table 4. Content of phenolic compounds in the top biomass of *Rhodiola rosea* L. (Gorny Altai)

Компонент	Время удерживания, сек	Номер пика хроматограммы	Количественное содержание, мг/г
Астрагалин	1068,30	8	38,94 ± 2,21
Трицин-5-O-β-D-глюкопиранозид	1123,79	10	35,25 ± 1,66
Трицин-7-O-β-D-глюкопиранозид	1152,96	9	30,23 ± 1,45
Тирозол	1477,08	14	21,80 ± 1,21
Трицин	1754,94	2	13,07 ± 0,72

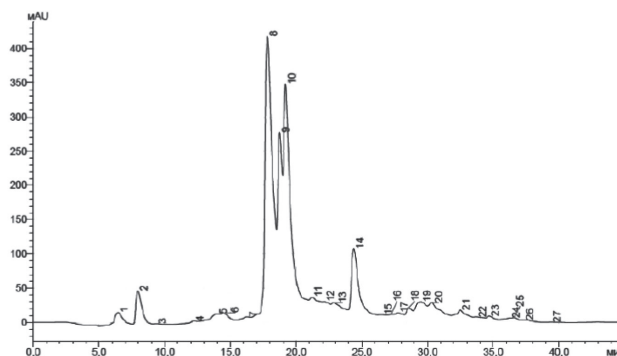


Рисунок 5. Хроматограмма этанольного извлечения фенолов из надземной биомассы родиолы розовой (*Rhodiola rosea* L.) в популяции Горного Алтая

Figure 5. Chromatogram of ethanol extraction of phenols from the top biomass of *Rhodiola rosea* L. (Gorny Altai)

Анализ биоматериала корневищ с корнями и надземной биомассы родиолы розовой, интродуцированных из трех эколого-географически отдаленных ареалов, позволил установить, что они существенно отличаются по содержанию биологически активных веществ. Изменчивость показателей по одним и тем же компонентам БАВ связана с почвенно-климатическими факторами местообитания растений: световым, тепловым, водным и питательным режимами фрагментарных почв.

Для практического извлечения максимального количества и привлечения в пищевые биотехнологии можно рекомендовать биоматериал, районированный по территориям: розавин, салидрозид и метилгаллат – Кузнецкий Алатау; салидрозид, галловая кислота, дафнетицин и розеин – Горный Алтай; метилгаллат, розавин и коричный альдегид – Тункинские хребты; трицин и его производные, астрагалин и тирозол – из надземной биомассы родиолы розовой в популяции Горного Алтая.

От степени развития морфометрических характеристик растения зависит уровень фотосинтеза и накопления пластических веществ в корневищах. Это дает прогноз того насколько можно ожидать разницу в накоплении общей биологической

Таблица 5. Средние параметры побегов родиолы розовой (*Rhodiola rosea* L.) различных популяций (2019–2020 гг.)Table 5. Average dimensions of *Rhodiola rosea* L. shoots in different plant communities (2019–2020)

Популяция растений	Длина побега, см	Число листьев, шт	Плотность листьев	Диаметр побега, мм		
				в основании	в середине	под верхним листом
Горный Алтай	13,20 ± 0,03	35,00 ± 0,68	9,40 ± 0,24	3,60 ± 0,05	3,10 ± 0,07	2,20 ± 0,08
Кузнецкий Алатау	8,18 ± 0,04	14,80 ± 0,11	7,26 ± 0,07	5,00 ± 0,06	3,80 ± 0,06	2,10 ± 0,06
Тункинские хребты	12,03 ± 0,09	42,20 ± 0,12	14,10 ± 0,11	4,80 ± 0,10	3,40 ± 0,07	2,50 ± 0,07

Таблица 6. Содержание фотосинтетических пигментов в надземной массе родиолы розовой (*Rhodiola rosea* L.) различных популяций (2019–2020 гг.)Table 6. Content of photosynthetic pigments in the top mass of *Rhodiola rosea* L. from different plant communities (2019–2020)

Популяция растений	Содержание хлорофиллов, мг/г				Содержание каротиноидов, мг/г (%)	Соотношение хлорофиллов (a + b)/каротиноидов
	a	b	a + b	a/b		
Горный Алтай	0,258	0,120	0,378	2,15	0,122 (32,3)	3,10
Кузнецкий Алатау	0,230	0,090	0,323	2,55	0,090 (27,9)	3,59
Тункинские хребты	0,212	0,085	0,297	2,49	0,115 (37,8)	2,58
Среднее	0,233	0,098	0,333	2,40	0,109	3,05
Размах варьирования	0,046	0,035	0,081	0,40	0,032	1,01

продуктивности корневищ и травянистой части, с одной стороны, фотосинтетической продуктивности, с другой. Побег и листья имеют хорошо выраженную зеленую окраску. Но важно понимать насколько изучаемые популяции различны по накоплению фотосинтетических пигментов, имеющих значение в профилактике заболеваний и поддержании здоровья у разных групп населения.

В данном исследовании представлены результаты измерений линейных параметров побегов в период весенней вегетации (2019–2020 гг.) (табл. 5) и анализа содержания фотосинтетических пигментов в надземной массе родиолы розовой различных популяций (табл. 6).

При культивировании интродуцированных популяций родиолы розовой отмечено, что образцы существенно отличаются по фенотипу растения, по размерам и форме листьев. Растения из популяции Горного Алтая сформировали куст из большого числа побегов (9–11 шт) по сравнению с образцами из Кузнецкого Алатау (5–7 шт) и Тункинских гольцов (Бурятия) (6–8 шт).

В надземной биомассе родиолы розовой изучаемых популяций накапливается порядка

0,333 мг/г хлорофиллов *a* и *b* в суммарном выражении. При этом на треть меньше синтезируется каротиноидов. На этом фоне на диапазон от 9,6 % до 18,3 % больше накапливают хлорофиллы *a* и *b* образцы растения из популяции Кузнецкого Алатау и Горного Алтая. Последний из выше упомянутых имеет достоверное превышение по содержанию каротиноидов (на 26,3 %), в сравнении с показателями второго образца, но находится на одном уровне с показателями популяции родиолы розовой с Тункинских хребтов.

В результате расчета коэффициентов корреляции между содержанием фотосинтетических компонентов с морфометрическими признаками (размерностью побегов, числом листьев на побеге и их плотностью) установлено только две положительно высоких зависимости – по содержанию каротиноидов и числа листьев ($r = 0,89 \pm 0,09$) и по содержанию каротиноидов и длины побега ($r = 0,96 \pm 0,22$) (табл. 7).

По другим парам признаков корреляционные связи были статистически незначительными или средними.

Таким образом, показана возможность извлечения фотосинтетических пигментов из

Таблица 7. Зависимость содержания фотосинтетических пигментов от морфометрических показателей растений

Table 7. Content of photosynthetic pigments vs. morphometric dimensions of plants

Показатели	Коэффициент корреляции (R ± r)			
	содержание хлорофилла <i>a</i>	содержание хлорофилла <i>b</i>	содержание хлорофиллов (<i>a</i> + <i>b</i>)	содержание каротиноидов
Длина побега	0,37 ± 0,10	0,63 ± 0,15	0,37 ± 0,08	0,96 ± 0,22
Число листьев	0,58 ± 0,09	0,43 ± 0,10	0,64 ± 0,13	0,89 ± 0,09
Плотность листьев	0,21 ± 0,06	0,17 ± 0,04	0,011 ± 0,03	0,65 ± 0,09
Диаметр побега	0,34 ± 0,010	0,18 ± 0,04	0,46 ± 0,11	0,21 ± 0,06

надземной биомассы родиолы розовой для целевого использования в пищевых технологиях. Однако в настоящее время для этих целей в большей мере используют фитохимические вещества из корневищ и корней.

Выводы

В ходе исследований идентифицировано 12 биологически активных компонента фенольной природы из популяции родиолы розовой (*Rhodiola rosea* L.) Горного Алтая. В корневищах с корнями установлено максимальное содержание (мг/г) галловой кислоты ($10,26 \pm 2,31$), розеина ($20,45 \pm 3,46$), дафнетицина ($13,80 \pm 2,30$) и салидрозида ($28,16 \pm 2,27$); в надземной части растения – астрагалина ($38,94 \pm 2,21$), трицина ($13,07 \pm 0,72$) и его производных – трицин-5-О-β-D-глюкопиранозида ($35,25 \pm 1,66$), трицин-7-О-β-D-глюкопиранозида ($30,23 \pm 1,45$), тирозола ($21,80 \pm 1,21$).

Идентифицировано 5 биологически активных компонентов фенольной природы из популяции родиолы розовой Кузнецкого Алатау с максимальным содержанием (мг/г) в корневищах с корнями розавина ($16,89 \pm 2,11$) и салидрозида ($14,35 \pm 2,52$).

Идентифицировано 6 биологически активных компонентов фенольной природы из популяции родиолы розовой Тункинских хребтов Бурятии с максимальным содержанием (мг/г) в корневищах с корнями розавина ($20,72 \pm 2,11$), метилгалата ($39,00 \pm 1,05$) и коричневого альдегида ($10,15 \pm 1,93$).

В среднем в надземной биомассе родиолы розовой изучаемых популяций накапливается порядка 0,333 мг/г хлорофиллов *a* и *b* в суммарном выражении. При этом каротиноидов синтезируется 0,109 мг/г по трем популяциям. Установлены коэффициенты корреляции между содержанием фотосинтетических компонентов с морфометрическими признаками. Обнаружены две положительно высоких зависимости

– по содержанию каротиноидов и числа листьев ($r = 0,89 \pm 0,09$) и по содержанию каротиноидов и длины побега ($r = 0,96 \pm 0,22$).

Для сохранения биоразнообразия ареалов родиолы розовой как вида, занесенного в Красную книгу Российской Федерации и в Красные книги большинства субъектов РФ, рекомендуется активно вводить уникальные растения в биотехнологии микрклонального размножения, селективного отбора форм с повышенным содержанием вторичных метаболитов и последующего выращивания в культуре *in vitro*. Индивидуальный отбор генотипов с повышенными показателями БАВ и последующим введением в культуру *in vitro* позволит без ущерба для окружающей среды получать планируемый объём вторичных метаболитов.

Критерии авторства

И. Ю. Сергеева – аналитический обзор литературы, написание и общая редакция рукописи. А. В. Заушинцева – методология и организация исследований. Е. Н. Брюхачев – получение фактического материала.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

I.Yu. Sergeeva reviewed scientific sources, wrote and proof-read the manuscript. A.V. Zaushintsen developed the methodology and supervised the research. E.N. Bryukhachev was responsible for obtaining the factual material.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article

Список литературы

1. Куркина, А. В. Флавоноиды фармакопейных растений / А. В. Куркина. – Самара : Офорт, 2012. – 290 с.
2. Флавоноиды: биохимия, биофизика, медицина / Ю. С. Тараховский, Ю. А. Ким, Б. С. Абдрасилов [и др.]. – Пушкино : Synchronobook, 2013. – 310 с.
3. The role of food antioxidants, benefits of functional foods, and influence of feeding habits on the health of the older person: An overview / D. W. Wilson, P. Nash, H. Singh [et al.] // Antioxidants. – 2017. – Vol. 6, № 4. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox6040081>.
4. Folic acid prevents cardiac dysfunction and reduces myocardial fibrosis in a mouse model of high-fat diet-induced obesity / W. Li, R. Tang, S. Ouyang [et al.] // Nutrition and Metabolism. – 2017. – Vol. 14, № 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12986-017-0224-0>.
5. Antiproliferative and proapoptotic activities of anthocyanin and anthocyanidin extracts from blueberry fruits on B16-F10 melanoma cells / E. Wang, Y. Liu, C. Xu [et al.] // Food and Nutrition Research. – 2017. – Vol. 61. DOI: <https://doi.org/10.1080/16546628.2017.1325308>.
6. Dietary fibres differentially impact on the production of phenolic acids from rutin in an in vitro fermentation model of the human gut microbiota / J. Havlik, V. Marinello, A. Gardyne [et al.] // Nutrients. – 2020. – Vol. 12, № 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu12061577>.

7. Kolb, H. Health effects of coffee: mechanism unraveled? / H. Kolb, K. Kempf, S. Martin // *Nutrients*. – 2020. – Vol. 12, № 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu12061842>.
8. Urinary metabolomic profiling analysis and evaluation of the effect of *Ecklonia cava* extract intake / J. Kim, Y. Jung, E. Lee [et al.] // *Nutrients*. – 2020. – Vol. 12, № 5. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu12051407>.
9. Anti-inflammatory effects of *Rhodiola rosea* L.: A review / W.-L. Pu, M.-Y. Zhang, R.-Y. Bai [et al.] // *Biomedicine and Pharmacotherapy*. – 2020. – Vol. 121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2019.109552>.
10. Nikolaichuk, H. Effect directed detection of *Rhodiola rosea* L. root and rhizome extract / H. Nikolaichuk, M. Studziński, I. M. Choma // *Journal of Liquid Chromatography and Related Technologies*. – 2020. – Vol. 43, № 11–12. – P. 361–366. DOI: <https://doi.org/10.1080/10826076.2020.1725549>.
11. Extracts of *Rhodiola rosea* L. and *Scutellaria galericulata* L. in functional dairy products / A. V. Zaushintsena, E. N. Bruhachev, O. V. Belashova [et al.] // *Foods and Raw Materials*. – 2020. – Vol. 8, № 1. – P. 163–170. DOI: <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-1-163-170>.
12. Anti-inflammatory effect of salidroside on phorbol-12-myristate-13-acetate plus A23187-mediated inflammation in HMC-1 cells / D.-W. Yang, O.-H. Kang, Y.-S. Lee [et al.] // *International Journal of Molecular Medicine*. – 2016. – Vol. 38, № 6. – P. 1864–1870. DOI: <https://doi.org/10.3892/ijmm.2016.2781>.
13. Современная фитотерапия как наука и учебная дисциплина в медицинском и фармацевтическом образовании / В. А. Куркин, Е. В. Авдеева, А. В. Куркина [и др.] // *Медицинский вестник Башкортостана*. – 2016. – Т. 11, № 5 (65). – С. 149–152.
14. Использование биологически активных веществ лекарственных растений Сибири в функциональных напитках на основе молочной сыворотки / С. А. Иванова, И. С. Милентьева, Л. К. Асякина [и др.] // *Техника и технология пищевых производств*. – 2019. – Т. 49, № 1. – С. 14–22. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-1-14-22>.
15. Galasso, C. Carotenoids from marine organisms: Biological functions and industrial applications / C. Galasso, C. Corinaldesi, C. Sansone // *Antioxidants*. – 2017. – Vol. 6, № 4. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox6040096>.
16. Antioxidant activities of aqueous extracts from 12 Chinese edible flowers *in vitro* and *in vivo* / F. Wang, M. Miao, H. Xia [et al.] // *Food and Nutrition Research*. – 2016. – Vol. 61, № 1. DOI: <https://doi.org/10.1080/16546628.2017.1265324>.
17. Fruit and vegetable intakes, dietary antioxidant nutrients, and total mortality in Spanish adults: Findings from the Spanish cohort of the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition (EPIC-Spain) / A. Agudo, L. Cabrera, P. Amiano [et al.] // *American Journal of Clinical Nutrition*. – 2007. – Vol. 85, № 6. – P. 1634–1642. DOI: <https://doi.org/10.1093/ajcn/85.6.1634>.
18. Шлык, А. А. Определение хлорофиллов и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев / А. А. Шлык // *Биохимические методы в физиологии растений* / О. А. Павлинова. – М. : Наука, 1971. – С. 154–157.
19. Введение в культуру *in vitro* вида *Rhodiola rosea* L. из популяции Кузнецкого Алатау / О. О. Бабич, А. Ю. Просеков, А. В. Заушинцева [и др.] // *Sciences of Europe*. – 2019. – Vol. 43, № 43–1. – P. 3–7.
20. Определение гидроксикоричных кислот в лекарственном растительном сырье и объектах растительного происхождения / Ю. В. Медведев, О. И. Передеряев, А. П. Арзамасцев [и др.] // *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*. – 2010. – № 3. – С. 25–31.
21. Pellati, F. Simultaneous metabolite fingerprinting of hydrophilic and lipophilic compounds in *Echinacea pallida* by high-performance liquid chromatography with diode array and electrospray ionization-mass spectrometry detection / F. Pellati, G. Orlandini, S. Benvenuti // *Journal of Chromatography A*. – 2012. – Vol. 1242. – P. 43–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2012.04.025>.

References

1. Kurkina AV. Flavonoidy farmakopeynykh rasteniy [Flavonoids of pharmacopoeial plants]. Samara: Ofort; 2012. 290 p. (In Russ.).
2. Tarakhovskiy YuS, Kim YuA, Abdrasilov BS, Muzafarov EN. Flavonoidy: biokhimiya, biofizika, meditsina [Flavonoids: biochemistry, biophysics, and medicine]. Pushchino: Sunchrobook; 2013. 310 p. (In Russ.).
3. Wilson DW, Nash P, Singh H, Griffiths K, Singh R, De Meester F, et al. The role of food antioxidants, benefits of functional foods, and influence of feeding habits on the health of the older person: An overview. *Antioxidants*. 2017;6(4). DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox6040081>.
4. Li W, Tang R, Ouyang S, Ma F, Liu Z, Wu J. Folic acid prevents cardiac dysfunction and reduces myocardial fibrosis in a mouse model of high-fat diet-induced obesity. *Nutrition and Metabolism*. 2017;14(1). DOI: <https://doi.org/10.1186/s12986-017-0224-0>.
5. Wang E, Liu Y, Xu C, Liu J. Antiproliferative and proapoptotic activities of anthocyanin and anthocyanidin extracts from blueberry fruits on B16-F10 melanoma cells. *Food and Nutrition Research*. 2017;61. DOI: <https://doi.org/10.1080/16546628.2017.1325308>.
6. Havlik J, Marinello V, Gardyne A, Hou M, Mullen W, Morrison DJ. Dietary fibres differentially impact on the production of phenolic acids from rutin in an *in vitro* fermentation model of the human gut microbiota. *Nutrients*. 2020;12(6). DOI: <https://doi.org/10.3390/nu12061577>.

7. Kolb H, Kempf K, Martin S. Health effects of coffee: mechanism unraveled? *Nutrients*. 2020;12(6). DOI: <https://doi.org/10.3390/nu12061842>.
8. Kim J, Jung Y, Lee E, Jang S, Ryu DH, Kwon O, et al. Urinary metabolomic profiling analysis and evaluation of the effect of *Ecklonia cava* extract intake. *Nutrients*. 2020;12(5). DOI: <https://doi.org/10.3390/nu12051407>.
9. Pu W-L, Zhang M-Y, Bai R-Y, Sun L-K, Li W-H, Yu Y-L, et al. Anti-inflammatory effects of *Rhodiola rosea* L.: A review. *Biomedicine and Pharmacotherapy*. 2020;121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2019.109552>.
10. Nikolaichuk H, Studziński M, Choma IM. Effect directed detection of *Rhodiola rosea* L. root and rhizome extract. *Journal of Liquid Chromatography and Related Technologies*. 2020;43(11–12):361–366. DOI: <https://doi.org/10.1080/10826076.2020.1725549>.
11. Zaushintsena AV, Bruhachev EN, Belashova OV, Asyakina LK, Kurbanova MG, Vesnina AD, et al. Extracts of *Rhodiola rosea* L. and *Scutellaria galericulata* L. in functional dairy products. *Foods and Raw Materials*. 2020;8(1):163–170. DOI: <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-1-163-170>.
12. Yang D-W, Kang O-H, Lee Y-S, Han S-H, Lee S-W, Cha S-W, et al. Anti-inflammatory effect of salidroside on phorbol-12-myristate-13-acetate plus A23187-mediated inflammation in HMC-1 cells. *International Journal of Molecular Medicine*. 2016;38(6):1864–1870. DOI: <https://doi.org/10.3892/ijmm.2016.2781>.
13. Kurkin VA, Avdeeva EV, Kurkina AV, Pravdivtseva OE, Braslavskii VB. Modern phytotherapy as the science and educational discipline in medical and pharmaceutical education. *Bashkortostan Medical Journal*. 2016;11(5)(65):149–152.
14. Ivanova SA, Milentyeva IS, Asyakina LK, Lukin AA, Kriger OV, Petrov AN. Biologically active substances of siberian medical plants in functional wgey-based drinks. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2019;49(1):14–22. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-1-14-22>.
15. Galasso C, Corinaldesi C, Sansone C. Carotenoids from marine organisms: Biological functions and industrial applications. *Antioxidants*. 2017;6(4). DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox6040096>.
16. Wang F, Miao M, Xia H, Yang L-G, Wang S-K, Sun G-J. Antioxidant activities of aqueous extracts from 12 Chinese edible flowers *in vitro* and *in vivo*. *Food and Nutrition Research*. 2016;61(1). DOI: <https://doi.org/10.1080/16546628.2017.1265324>.
17. Agudo A, Cabrera L, Amiano P, Ardanaz E, Barricarte A, Berenguer T, et al. Fruit and vegetable intakes, dietary antioxidant nutrients, and total mortality in Spanish adults: Findings from the Spanish cohort of the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition (EPIC-Spain). *American Journal of Clinical Nutrition*. 2007;85(6):1634–1642. DOI: <https://doi.org/10.1093/ajcn/85.6.1634>.
18. Shlyk AA. Opredelenie khlorofillov i karotinoidov v ehkstraktakh zelenykh list'ev [Determining chlorophylls and carotenoids in green leaf extracts]. In: Pavlinova OA, editor. *Biokhimicheskie metody v fiziologii rasteniy* [Biochemical Methods in Plant Physiology]. Moscow: Nauka; 1971. pp. 154–157. (In Russ.).
19. Babich OO, Prosekov AYu, Sauschinzena AV, Bryukhachev EN, Cooper AE, Hanjina AV, et al. Introduction in vitro culture of *Rhodiola rosea* L. species from a population of Kuznetsk Alatau. *Sciences of Europe*. 2019;43(43–1):3–7. (In Russ.).
20. Medvedev YuV, Perederyaev OI, Arzamastsev AP, Eller KI, Prokofeva VI. Determination of hydroxycinnamic acids in raw medicinal plant materials and plant extracts. *Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*. 2010;(3):25–31. (In Russ.).
21. Pellati F, Orlandini G, Benvenuti S. Simultaneous metabolite fingerprinting of hydrophilic and lipophilic compounds in *Echinacea pallida* by high-performance liquid chromatography with diode array and electrospray ionization-mass spectrometry detection. *Journal of Chromatography A*. 2012;1242:43–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2012.04.025>.

Сведения об авторах

Сергеева Ирина Юрьевна

д-р техн. наук, доцент, заведующая кафедрой технологии продуктов питания из растительного сырья, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел.: +7 (3842) 39-68-55, e-mail: sergeeva.76@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1686-0131>

Заушинцена Александра Васильевна

д-р био. наук, профессор, профессор кафедры экологии и природопользования, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел.: +7 (3842) 58-01-66, e-mail: alexaz58@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4645-828X>

Information about the authors

Irina Yu. Sergeeva

Dr.Sci.(Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Foods from Vegetable Raw Technology, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-55, e-mail: sergeeva.76@list.ru


<https://orcid.org/0000-0002-1686-0131>

Alexandra V. Zaushintsena


Dr.Sci.(Bio.), Professor, Professor of the Department of Ecology and Environmental Management, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7 (3842) 58-01-66, e-mail: alexaz58@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4645-828X>

Брюхачев Евгений Николаевич

старший преподаватель кафедры физического воспитания, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел.: +7 (950) 271-81-69, e-mail: bruhachev86@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-9334-6606>

Evgeniy N. Bryukhachev

Senior Lecturer of the Department of Physical Education, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7 (950) 271-81-69, e-mail: bruhachev86@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-9334-6606>