

УДК 547.94+547.965+577.112.3

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЛКОВ РАСТЕНИЯ *RINDERA CYCLODONTA**

© Ш.Х. Рахимова^{1*}, Х.Н. Олимова^{1*}, У.Х. Курбанов¹, З.Ч. Абраева², Н.И. Мукаррамов³,
Ж.М. Абдурахманов¹, Ш.Ш. Сагдуллаев¹

¹ Институт химии растительных веществ им. акад. С.Ю. Юнусова
АН РУз, ул. Мирзо Улуғбека, 77, Ташкент, 100170, Узбекистан,
shahnoza2380@mail.ru

² Университет Альфраганус, ул. Юкори Каракамыш, 2А, Ташкент, 100190,
Узбекистан

³ Научно-исследовательский институт карантина и защиты растений,
ул. Бабура, 4, Кибрайский район, Ташкентская область, 111215,
Узбекистан

Впервые проведено комплексное исследование белков растения *Rindera cyclodonta* и шрота, оставшегося после извлечения алкалоидов. Сравнительный анализ выполнен с использованием методов электрофореза в полиакриламидном геле (ПААГ), инфракрасной спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии, аминокислотного анализа и элементного состава. Установлены изменения в структуре и составе белков после удаления алкалоидов, выявлены особенности аминокислотного профиля. Полученные данные дополняют сведения о химическом составе *R. cyclodonta* и могут быть использованы для оценки потенциала использования растительного сырья.

В статье представлены результаты содержания общего белка: 8.9% в образце I (исходное) и 6.7% во II (шрот, полученный после извлечения алкалоидов), электрофоретического анализа белков двух образцов растения *R. cyclodonta* в условиях ПААГ. Установлены различия в молекулярной массе белковых фракций, подтверждено наличие низкомолекулярных субъединиц и высокомолекулярных компонентов. Дополнительно проведен аминокислотный анализ, ИК-спектроскопия, сканирующая электронная микроскопия и элементного состава. Анализ аминокислотного состава образцов I и II выявил количественные различия в концентрациях отдельных аминокислот. Общее содержание аминокислот в образцах составило 81.360 и 82.130 мг/г соответственно, что говорит о близких значениях общего аминокислотного профиля, однако распределение отдельных аминокислот существенно отличается. Сканирующая электронная микроскопия выявила микроструктурные различия поверхности тканей растений. В образце I поверхность более упорядочена, в то время как во II преобладают рыхлые и менее организованные структуры, что может коррелировать с различиями в белковом составе. Проведен анализ функциональных групп, выявленных по характерным полосам поглощения. Полученные данные подтверждают наличие в образцах биологически активных соединений. Исследование позволяет охарактеризовать химический состав растения и использовать его в дальнейшем фармакологическом анализе. С использованием метода энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС), установлено наличие как органических (С, О, N), так и неорганических компонентов (Ca, Mg, S, Fe и др.), отражающих структурные особенности и возможную степень минерализации белков. Проведенная сравнительная характеристика двух образцов позволила выявить различия в содержании азота, серы и микроэлементов, что может быть обусловлено тканевой принадлежностью и способом выделения.

Ключевые слова: *Rindera cyclodonta*, белки, шрот, аминокислоты, электрофорез, ИК-спектроскопия, СЭМ, ЭДС, микроэлементы.

Для цитирования: Рахимова Ш.Х., Олимова Х.Н., Курбанов У.Х., Абраева З.Ч., Мукаррамов Н.И., Абдурахманов Ж.М., Сагдуллаев Ш.Ш. Физико-химическое исследование белков растения *Rindera cyclodonta* // Химия растительного сырья. 2026. №2. С. 150–159. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260217366>.

Введение

Род *Rindera* (семейство Boraginaceae) включает [1] около 20 видов, распространенных преимущественно в Центральной Азии, на Кавказе и в Юго-Восточной Европе. Эти растения известны как источники

* Данная статья имеет электронный дополнительный материал (приложение), который доступен читателям на сайте журнала. DOI: 10.14258/jcprm.20260217366s

** Автор, с которым следует вести переписку.

пирролизидиновых алкалоидов [2], флавоноидов и других биологически активных соединений с антиоксидантной, антимикробной, иммуномодулирующей и цитотоксической активностью [3–7]. Однако первичные метаболиты, в частности белки, остаются недостаточно изученными. Белки играют ключевую роль в метаболизме, выполняют структурные, ферментативные и регуляторные функции. Они могут участвовать в связывании или детоксикации вторичных метаболитов, включая токсичные алкалоиды, и представляют интерес как потенциальные биомаркеры. Аминокислотный состав растительных белков важен для оценки их биологической ценности и возможности использования в фармацевтической или пищевой промышленности [8–11].

На сегодняшний день белки *R. cyclodonta* не описаны в научной литературе. Большинство исследований сосредоточено на вторичных метаболитах. Учитывая фармакологический потенциал рода *Rindera*, комплексное изучение его белковых компонентов представляет научный интерес.

Целью настоящей работы является исследование белков исходного растения *R. cyclodonta* и жмыха, оставшегося после извлечения алкалоидов, с применением комплекса физико-химических методов: электрофореза, ИК-спектроскопии, СЭМ, аминокислотного анализа и элементного состава. Это позволит не только более полно охарактеризовать структуру и свойства белков, но и определить возможности вторичного использования растительного остатка.

Экспериментальная часть

Объектом исследования являлись белки растения *Rindera cyclodonta* (семейство Boraginaceae), собранного в фазе окончания цветения – начала плодоношения в мае 2024 г. в Форишском районе Джизакской области. Надземную часть растения сушили и измельчали с помощью лабораторной мельницы. Растительное сырье экстрагировали восемь раз 80% этанолом. Полученный экстракт фракционировали на сумму алкалоидов в зависимости от полярности растворителей. Оставшийся после экстракции шрот использовали для исследования белковых компонентов. Наличие белков в шроте подтверждали качественной реакцией осаждения с использованием кремний-вольфрамовой кислоты.

В работе анализируются два образца: образец I – исходное высушенное растительное сырье (надземная часть), образец II – шрот, полученный после извлечения алкалоидов. Для сравнительной характеристики использованы следующие методы: электрофорез в ПААГ, аминокислотный анализ, ИК-спектроскопия, сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и элементный анализ.

Количественное определение общего содержания белка в образцах проводили по методу Кьельдаля с использованием реактива Несслера, основанному на определении общего азота с последующим пересчетом на белок с использованием коэффициента 6.25. От подготовленных проб отбирали навески в термостойкие колбы, приливали концентрированной серной кислоты H_2SO_4 (ρ 1.84 г/см³) и разлагали в плитке, избегая бурного кипения. Окончанием процесса минерализации являлось получение абсолютно прозрачного бесцветного раствора. В подготовленных пробах определяли содержание белка колориметрическим методом с реактивом Несслера. Оптическую плотность растворов измеряли при 400 нм на спектрофотометре V-5000 Metash. [12, 13]. Анализ проводили в двукратной повторности.

Согласно стандартной методике [14] щелочной экстракции с последующей осаждением, выделены белки. Белковые препараты были получены из надземной части растения *Rindera cyclodonta* и из шрота, оставшегося после экстракции алкалоидов. Экстракцию проводили с использованием 0.1 М раствора NaOH при жидкостном модуле (1 : 10). После перемешивания в течение 2 ч при комнатной температуре смесь центрифугировали при 6000 об./мин в течение 20 мин. Супернатант подкисляли 1 М HCl до изоэлектрической точки (pH 4–5), осадок отделяли центрифугированием при 8000 об./мин в течение 15 мин при 4 °C и промывали дистиллированной водой. Полученные белки сушили при 40 °C до постоянной массы.

Аминокислотный состав белков определяли после гидролиза в 6 М растворе HCl при 110 °C в течение 24 ч в герметично запаянных ампулах. Гидролизаты высушивали в вакууме и растворяли в цитратном буфере (pH 2.2). Для определения аминокислотного состава использовался метод высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) после предварительного гидролиза белков. Количественное определение аминокислот проводилось в миллиграмм на грамм сухого вещества. Осаждение белков и пептидов водного экстракта образцов проводили в центрифужных стаканах. Для этого к 1 мл образца добавляли 1.0 мл 20%-ного раствора ТХУК (трихлор уксусная кислота). Через 10 мин осадок отделяли центрифугированием при 8000 об./мин в течение 15 мин. Отделив 0,1 мл надосадочной жидкости, лиофильно высушивали. Гидролизат упаривали, сухой остаток растворяли в смеси триэтиламин – ацетонитрил – вода (1 : 7 : 1) и высушивали. Эту операцию

повторяли дважды для нейтрализации кислоты. Реакцией с фенилтиоизоцианатом получали фенилтиокарбамил-производные (ФТК) аминокислот по методу Steven A., Cohen Daviel [15]. Идентификацию производных аминокислот проводили методом ВЭЖХ. Условия ВЭЖХ: хроматограф Agilent Technologies 1200 с DAD детектором, колонка 75×4.6 mm Discovery HS C₁₈. Раствор А: 0.14 М CH₃COONa + 0.05% ТЭА pH 6.4, В: CH₃CN. Скорость потока 1.2 мл/мин, поглощение 269 нм. Градиент %В/мин: 1–6%/0–2.5 мин; 6–30%/2.51–40 мин; 30–60%/40.1–45 мин; 60–60%/45.1–50 мин; 60–0%/50.1–55 мин.

Инфракрасные спектры белков исследуемых двух образцов (исходного растения и шрота после извлечения алкалоидов) были зарегистрированы с использованием ИК-Фурье спектрофотометра Perkin-Elmer (США) в диапазоне 4000–400 см⁻¹ [16]. Образцы подготавливали по методу прессования с бромистым калием (KBr) в виде таблеток.

Электрофоретический анализ проводили методом электрофореза в ПААГ по Лэммли [17, 18]. Белковые образцы растворяли в буфере с лаурилсульфатом натрия (SDS), кипятили в течение 5 мин и наносили на гель. Электрофорез проводили при напряжении 120 В до достижения фронта красящего индикатора. Белки визуализировали с использованием кумасси синего G-250. Молекулярные массы определяли по калибровочной шкале, основанной на белковых маркерах стандартного набора (для калибровки использовали стандартный набор белковых маркеров молекулярной массы 10–180 кДа (Thermo Fisher Scientific, США).

Микроструктура и морфологические особенности белков были исследованы с использованием сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-IT210 (Япония) [19, 20]. Изображения получали при ускоряющем напряжении 5 кВ. Для анализа использовали диапазон увеличений 5–50 мкм, что позволило изучить как общую структуру поверхности, так и мелкомасштабные морфологические элементы. Для предотвращения зарядки и улучшения качества изображения поверхность образцов покрывали тонким слоем платины с помощью ионно-напылительной установки.

Для изучения элементного состава и химических свойств композита использовалась энергия дисперсионной спектроскопии (ЭДС) на приборе InTouchScope™ компании Oxford Instruments (Великобритания). Для улучшения спектральной чувствительности было установлено напряжение 20 кВ, а время регистрации спектра составило 50 секунд. Метод картирования (mapping) использовался для анализа пространственного распределения элементов на поверхности образцов. В результате анализа были идентифицированы следующие элементы: углерод (С), азот (N), кислород (O), магний (Mg), алюминий (Al), натрий (Na), сера (S), калий (K), медь (Cu) и кальций (Ca).

Результаты и обсуждение

Количественный анализ показал, что содержание общего белка в образце I (исходное растительное сырье) составило 8.9%, а в образце II (шрот после извлечения алкалоидов) – 6.7%. Снижение содержания белка во втором образце может быть связано с технологической обработкой и частичной потерей азотсодержащих соединений.

Далее был изучен аминокислотный состав белков в образце I, а также оценка аминокислотного профиля шрота образца II с целью его возможной утилизации. Аминокислотный анализ показал различия в концентрациях основных аминокислот, включая глицин, аланин и лейцин. В образце I отмечается более высокий уровень ароматических аминокислот. Результаты анализа приводим в таблице 1.

Как следует из таблицы 1, в обоих образцах сохраняется значительное количество как заменимых, так и незаменимых аминокислот. Существенные различия в уровне пролина, серина, глицина и лейцина свидетельствуют о перераспределении белковых фракций в результате экстракции алкалоидов. Суммарное содержание аминокислот в образцах близко по значению: 81.360 мг/г в образце I и 82.130 мг/г в образце II. Это свидетельствует о том, что значительная часть белкового компонента сохраняется даже после экстракции алкалоидов, что подчеркивает потенциал использования шрота в качестве побочного продукта с ценным аминокислотным составом. Однако распределение отдельных аминокислот между образцами существенно различается. В образце I отмечается чрезвычайно высокое содержание пролина (30.267 мг/г), что указывает на возможное преобладание структурных белков (например, клеточной стенки), для которых пролин играет важную роль в стабилизации конфигурации. В образце II концентрация пролина значительно ниже (6.688 мг/г), что может быть результатом частичного разрушения или удаления этих белков при экстракции алкалоидов. В то же время в образце II, наблюдается значительное повышение содержания серина (18.376 мг/г против 1.364 мг/г в образце I), а также глицина (4.243 мг/г против 2.149 мг/г), что может

свидетельствовать о преобладании более простых или гидрофильных белков в остаточном материале. Высокий уровень лейцина (16.075 мг/г) также подчеркивает сохранение биологически активных аминокислот даже после извлечения алкалоидов. Некоторые аминокислоты, такие как аспарагин, глутамин и триптофан, не были обнаружены в обоих образцах, что, вероятно, связано с их нестабильностью или низкой концентрацией, не превышающей порог чувствительности метода анализа.

Таким образом, полученные данные демонстрируют, что, несмотря на технологическую обработку, II образец (шрот после экстракции алкалоидов) сохраняет значимое количество аминокислот, включая незаменимые. Это делает его потенциально ценным сырьем для вторичного использования.

Было установлено, что в образце I в области молекулярной массы около 55 кДа наблюдается слабо-выраженная полоса, соответствующая *minor*-белковой фракции. В образце II выявлены интенсивные полосы в диапазоне 20–30 кДа, что свидетельствует о наличии субъединиц белков с низкой молекулярной массой. Результаты электрофореза приведены на рисунке 1 в электронном приложении. Различие в белковом составе между двумя образцами может быть обусловлено разной степенью дегградации белков, вариациями в условиях экстракции или различиями в физиологическом состоянии исходного материала. Обнаруженные фракции могут представлять собой как структурные, так и ферментативной активные белки. Таким образом, метод электрофореза подтвердил свою эффективность для качественной оценки белкового состава исследуемых образцов и выявления различий между ними.

ИК-спектры белков, выделенных из образцов I и II, были зарегистрированы на ИК-Фурье спектрофотометре Perkin-Elmer (США) в диапазоне 4000–400 см⁻¹ в виде таблеток с KBr.

В ИК-спектре белка образца I наблюдаются полосы поглощения, соответствующие следующим функциональным группам (ν_{max} , см⁻¹): 3267 (ОН), 3148 (NH), 2931 (-CH₃), 1589 (C=O), 1507 (-NH₂), 1403, 1241 (-CH₂), 1269 и 1056 (-C-O-C-), 807 ((Ar)-C-H), 610 (C-SH).

ИК-спектр белка образца II характеризуется полосами поглощения при: 3243 (ОН), 3103 (NH), 2968 (-CH₃), 1597 (C=O), 1512 (-NH₂), 1407 (ароматическое кольцо), 1239 (-CH₂), 1241 и 1065 (-C-O-C-), 810 ((Ar)-C-H), 610 (C-SH).

Таблица 1. Состав аминокислот белков *R. cyclodonta*

Аминокислоты	Концентрация аминокислот, мг/г	
	Образец I	Образец II
<i>Заменимые аминокислоты</i>		
Gly	2.149	4.243
Ala	2.443	1.280
Ser	1.364	18.376
Asp	1.356	2.112
Glu	1.283	1.429
<i>Ароматическая аминокислота</i>		
Tyr	1.103	1.068
Σ заменимых	9.698	28.508
<i>Незаменимые аминокислоты</i>		
Val	2.013	1.706
Ile	4.847	1.558
Leu	4.919	16.075
Thr	0.934	1.861
Met	2.701	1.599
Lys	1.420	0.508
Phe	15.340	15.111
Trp	0.0	0.0
Σ незаменимых	32.174	38.418
<i>Частично заменимые аминокислоты</i>		
Cys	1.780	1.543
Pro	30.267	6.688
His	6.409	6.149
Arg	1.030	0.823
Σ частично заменимых	39.486	15.203
Общая Σ	81.360	82.130

Проведен анализ функциональных групп, идентифицированных на основе характерных полос поглощения. На полученных ИК-спектроскопических кривых отчетливо наблюдаются полосы, соответствующие различным функциональным группам, присутствующим в составе исследуемого белкового материала растительного происхождения. Выявленные полосы подтверждают наличие характерных для белков функциональных групп (аминогруппы, карбонильные и гидроксильные фрагменты), что подтверждает белковую природу исследуемых образцов. Отмеченные различия в положениях и интенсивности полос поглощения между образцами I и II могут быть связаны с изменениями в составе аминокислотных остатков или степени структурной модификации белков в результате предварительной экстракции алкалоидов.

С помощью метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) были изучены морфологические и микроструктурные особенности поверхности двух образцов белков, выделенных из растения *R. cyclodonta*. Образец I представлял собой белок, выделенный из надземной части растения, тогда как образец II – белок, полученный из остаточной биомассы после экстракции алкалоидов. Наблюдения проводились при ускоряющем напряжении 5 кВ на различных уровнях увеличения.

Между исследуемыми образцами выявлены существенные различия в морфологии поверхности. Образец I характеризовался тонкой, волокнистой структурой с участками пластинчатых образований, аморфным строением, выраженной многослойностью и высокой пористостью. Наличие разрывов и рваных участков может быть связано с физическими воздействиями, возникающими в процессе выделения белка. Разветвленная система пор и значительная площадь поверхности указывают на высокую потенциальную пригодность данного белка в качестве биоматериала – например, носителя лекарственных веществ или биоактивной платформы.

В то же время белок образца II демонстрировал более плотную и агломерированную структуру. Поверхность состояла преимущественно из слипшихся слоев, местами переходящих в массивные пластинчатые образования. Внутренняя пористость практически не наблюдалась. Подобные морфологические изменения, по-видимому, являются следствием физико-химического воздействия, оказываемого экстракционной средой при удалении алкалоидов, что нарушает природную структуру белка и снижает его морфологическую целостность (рис. 1 и 2).

Сравнительный анализ показывает, что белок, выделенный непосредственно из растительного материала (образец I), обладает более благоприятными морфологическими характеристиками как биоматериал – высокой пористостью, значительной площадью поверхности и выраженной волокнистой структурой. Напротив, белок, оставшийся после экстракции алкалоидов (образец II), характеризуется более плотной морфологией, низкой пористостью и ограниченной площадью поверхности. Это свидетельствует о том, что экстракционная обработка оказывает негативное влияние на физико-морфологическое состояние белка и снижает его потенциал к дальнейшему применению. Результаты представлены на рисунке 3 и в таблице 2.

Элементный состав белков, выделенных из надземных частей *Rindera cyclodonta*, был исследован методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС). Анализ позволил выявить как органические, так и неорганические компоненты, входящие в состав биомолекул, и провести сравнительную характеристику между образцами I и II.

Результаты анализа элементного состава показали, что образец I характеризуется высоким содержанием органических элементов (С, О, N), а также наличием серы, кальция и микроэлементов. Детальные спектры приведены на рисунках 2 и 3 в электронном приложении, обобщенные данные представлены в таблицах 3 и 4.

В образце II зафиксировано более высокое содержание углерода (59.60 мас. %, 67.42 ат. %) и кислорода (36.09 мас. %, 31.16 ат. %). Азот в элементном спектре ЭДС не зарегистрирован, что обусловлено низкой чувствительностью метода к легким элементам, в частности азоту, в органических образцах. При этом наличие белковых компонентов подтверждено результатами электрофореза в ПААГ, аминокислотного анализа и ИК-спектроскопии. В составе также присутствуют микроэлементы: Са (2.90 мас. %), Fe (0.30 мас. %), Al, Na, S, Mg и Cl в меньших количествах. Наличие железа и хлора, отсутствующих в образце I, может свидетельствовать о более высокой степени минерализации или остаточном влиянии экстракционной обработки. Результаты представлены в таблице 4.

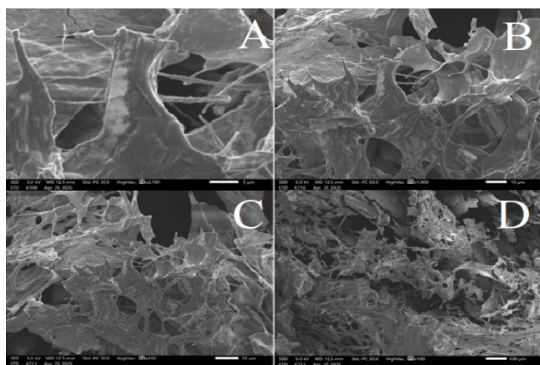


Рис. 1. Белок, выделенный из надземной части растений *R. Cyclodonta* а) 5 мкм, б) 10 мкм, в) 20 мкм, г) 100 мкм

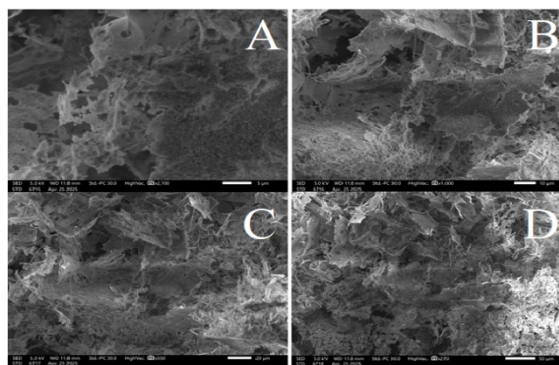


Рис. 2. Белок, выделенный из остатка после экстракции алкалоидов растения *R. cyclodonta* а) 5 мкм, б) 10 мкм, в) 20 мкм, г) 50 мкм

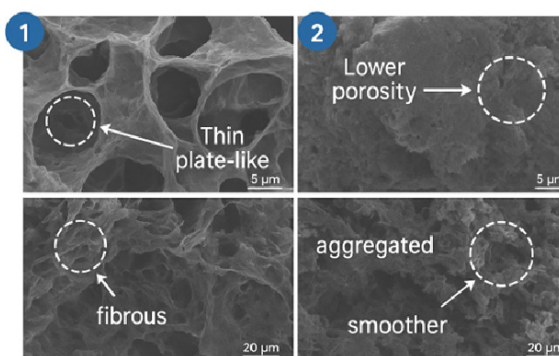


Рис. 3. 1 – образец I, 2 – образец II

Таблица 2. Сравнительные морфологические характеристики белков, выделенных из растения *Rindera cyclodonta*

Характеристика	Образец I	Образец II
Пористость	Высокая	Низкая
Структура	Волокнистая, разветвленная	Плотная, слипшаяся
Поверхность	Тонкие пластинки, разрывы	Более гладкая, агрегированная
Внешний вид	Лёгкая, открытая структура	Закрытая структура

Таблица 3. Элементный состав белка образца I

Элемент	Масса, %	Атом, %
Na	0.57±0.01	0.38±0.01
Mg	0.17±0.00	0.11±0.00
Al	0.23±0.00	0.13±0.00
S	10.87±0.02	5.23±0.01
K	0.20±0.00	0.08±0.00
Ca	1.30±0.01	0.50±0.00
Cu	0.12±0.01	0.03±0.00
Всего	13.46	6.46

Примечание: спектры элементов определены по К-линии.

Таблица 4. Элементный анализ белка образца II

Элемент	Масса, %	Атом, %
Na	0.13±0.01	0.08±0.00
Mg	0.30±0.01	0.17±0.00
Al	0.33±0.01	0.17±0.00
S	0.37±0.00	0.16±0.00
K	0.08±0.00	0.03±0.00
Ca	2.20±0.01	0.74±0.00
Cu	0.30±0.01	0.07±0.00
Всего	3.71	1.42

Сравнение двух образцов показало, что несмотря на сходство по основным органическим элементам (С, О), состав неорганических включений отличается. Образец I характеризуется присутствием Cu и более высоким содержанием Ca, тогда как для образца II характерно наличие Fe и Cl. Это может указывать на различную локализацию белков в тканях растения или их функциональную специализацию. Таким образом, данные ЭДС анализа позволяют сделать вывод о гетерогенности элементного состава белков в зависимости от способа выделения и степени минерализации тканей растения *R. cyclodonta*.

Таким образом, по данным ЭДС установлено, что белки обоих образцов содержат как органические, так и неорганические компоненты, причем степень минерализации и состав микроэлементов различаются, что может отражать функциональную и анатомо-морфологическую специфику их происхождения.

Заключение

В результате комплексного физико-химического исследования белков растения *Rindera cyclodonta* и шрота, оставшегося после экстракции алкалоидов, выявлены следующие основные закономерности:

1. В исходном образце (I) общий белок составил 8.9%, тогда как в остаточном (II) – 6.7%, что свидетельствует о частичной потере азотсодержащих соединений при щелочной экстракции и кислотном осаждении.

2. Суммарное содержание аминокислот практически не изменилось (81.360 мг/г в образце I и 82.130 мг/г в образце II), однако распределение отдельных аминокислот претерпело значительные сдвиги: в образце I доминировал пролин (30.267 мг/г), указывающий на высокое содержание структурных (клеточно-стенных) белков, а в образце II обнаружено резкое увеличение концентраций серина (18.376 мг/г), глицина (4.243 мг/г) и лейцина (16.075 мг/г), что говорит о преобладании более мелких, гидрофильных белковых фракций.

3. При ПААГ-электрофорезе в образце I выявлены высокомолекулярные фракции (~55 кДа), а в образце II – выраженные полосы субъединиц в диапазоне 20–30 кДа, подтверждая деградацию или селективное извлечение белков разной молекулярной массы.

4. В спектрах обоих образцов обнаружены характерные полосы для -ОН (3287 см⁻¹), С-Н (2931 см⁻¹), карбонильных (1700–1600 см⁻¹) и С-О/С-С (1400–1000 см⁻¹) групп. Интенсивность некоторых полос менялась в зависимости от образца, что отражает изменение соотношения функциональных групп после извлечения алкалоидов.

5. Морфология белков исходного растения характеризовалась волокнистой, пористой структурой с разветвленными пластинками, тогда как белок образца II из шрота имел более гладкую, плотно агрегированную поверхность с низкой пористостью, что свидетельствует о деформации естественной структуры при экстракции.

6. Оба образца характеризуются высоким содержанием органогенных элементов (С, О) и присутствием микроэлементов (Mg, Al, Na, S, K, Cu, Ca). Азот зарегистрирован методом ЭДС в образце I, тогда как в образце II не регистрируется, что связано с ограниченной чувствительностью метода к лёгким элементам.

В шроте отмечено относительное обогащение серой и металлическими элементами, вероятно, в результате взаимодействия экстракционного раствора с минеральными компонентами растительной ткани.

Таким образом, извлечение алкалоидов приводит не только к снижению общего содержания белка, но и к перераспределению его фракций, изменению аминокислотного состава и морфологии. При этом остаточный шрот сохраняет значительный белковый потенциал с высоким содержанием незаменимых аминокислот, что делает его перспективным объектом для вторичного использования в кормовых добавках или биоматериалах. Полученные результаты обосновывают необходимость дальнейших *in vivo* и *in vitro* экспериментов для оценки биологической активности и технологических свойств белков *R. cyclodonta* и его шрота.

Дополнительная информация

В электронном приложении к статье (DOI: <https://www.doi.org/10.14258/jcpr.20260217366s>) приведен дополнительный экспериментальный материал, раскрывающий основные положения, изложенные в статье.

Финансирование

Работа выполнена в рамках бюджетного (базового) финансирования Института химии растительных веществ АН РУз по направлению «Свойства, структура и биологическая активность полисахаридов и белков высших растений местного региона» и химическое исследование алкалоидов растений флоры Узбекистана, синтез и модификация алкалоидов, идентификация биологически активных синтетических и природных соединений.

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. El Shazly A., Witte L., Wink M. Diversity of Pyrrolizidine Alkaloids in the Boraginaceae Structures, Distribution, and Biological Properties // *Phytochemistry Reviews*. 2014. Vol. 6, no. 2. Pp. 188–282.
2. Nowak R., Drozd M., Mendyk E., Lemieszek M., Rzeski W., Kisiel W., Gawlik-Dziki U. Promising Potential of Crude Polysaccharides from *Sparassis crispa* against Colon Cancer: An In Vitro Study // *Industrial Crops and Products*. 2016. Vol. 83, no. 2. Pp. 410–421.
3. Olimova Kh.N., Kurbanov U.K., Okmanov R.Y., Tashkhodzhaev B., Mukarramov N.I., Turaeva S.M. Pyrrolizidine Alkaloids from *Heliotropium lasiocarpum* and Insecticidal Activity of Their Extracts // *Chemistry of Natural Compounds*. 2025. Vol. 61, no. 4. Pp. 748–754. <https://doi.org/10.1007/s10600-025-04748-6>.
4. Dresler S., Szymczak G., Wójcik M. Comparison of some secondary metabolite content in the seventeen species of the Boraginaceae family // *Pharmaceutical biology*. 2017. Vol. 55, no. 1. Pp. 691–695. <https://doi.org/10.1080/13880209.2016.1265986>.
5. Wink M. Modes of action of herbal medicines and plant secondary metabolites // *Medicines*. 2015. Vol. 2, no. 3. Pp. 251–286.
6. Luebert F., Cecchi L., Frohlich M.W., Gottschling M., Williams C.M., Hasenstab-Lehman K.E., Weigend M. Familial classification of the Boraginales // *Taxon*. 2016. Vol. 65, no. 3. Pp. 502–522. <https://doi.org/10.12705/653.5>.
7. Yin J. Evaluation of genetic variability *Rindera* using RAPD markers // *Genetika*. 2022. Vol. 54, no. 1. Pp. 173–186. <https://doi.org/10.2298/GENSR2201173Y>.
8. Ahmad M., Zafar M., Sultana S., Khan M.A., Qureshi R., Arshad M., Khan M.A. Microscopic investigations and pharmacognostic techniques used for the standardization of herbal drug *Nigella sativa* L. // *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*. 2012. Vol. 2, no. 3. Pp. 1599–1603.
9. Ganos C., Aligiannis N., Chinou I., Naziris N., Chountoulesi M., Mroczek T., Graikou K. *Rindera graeca* (Boraginaceae) phytochemical profile and biological activities // *Molecules*. 2020. Vol. 25, no. 16. Pp. 3625. <https://doi.org/10.3390/molecules25163625>.
10. Ghanbari H., Hamedeyazdan S., Ghanbari R., Alilou M., Delazar A., Ebrahimi S.N., Nazemiyeh H. Modern In Silico Molecular Docking Perspective for Investigation of *Rindera lanata* Bunge var. *lanata* Targeting: Phytochemical Profile, Phytotoxicity and Bioactivity Assays // *Pharmaceutical Sciences*. 2024. Vol. 30, no. 3. Pp. 312–331.
11. Yildirim H. A new *rindera* (boraginaceae) species from western anatolia, turkey // *Phytotaxa*. 2019. Vol. 427, no. 4. Pp. 249–258.
12. Sharma A., Rawat I., Kumar D., Kumar R. Cryobanking of primary somatic cells of elite farm animals—A pilot study in domesticated water buffalo (*Bubalus bubalis*) // *Cryobiology*. 2021. Vol. 98. Pp. 139–145. <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2020.11.014>.
13. Yao X., Liu H., Tabarestani M.S. Morphometric analysis and genetic diversity in *Rindera* (Boraginaceae-Cynoglossaceae) using sequence related amplified polymorphism // *Caryologia*. 2021. Vol. 74, no. 4. Pp. 69–76. <https://doi.org/10.36253/caryologia-1380>.
14. Ермаков А.И. Методы биохимического анализа растений. М., 1982. 430 с.
15. Машковский М.Д., Бабаян Э.А. Государственная фармакопея. М., 1989. 392 с.
16. Cohen S.A., Strydom D.J. Amino acid analysis utilizing phenylisothiocyanate derivatives // *Analytical biochemistry*. 1988. Vol. 174, no. 1. Pp. 1–16.
17. Васильев А.В., Гриненко Е.В., Щукин А.О., Федулина Т.Г. Инфракрасная спектроскопия органических и природных соединений. СПб., 2007. 54 с.
18. Carranza-Oropeza M.V., Sherrill A.W., Sanders J.R., Arce P.E., Giudici R. J. Performance assessment of protein electrophoresis by using polyacrylamide hydrogel with porous structure modified with SDS micelles as template // *Journal of Applied Polymer Science*. 2016. Vol. 133, no. 40. Pp. 1–9.
19. Wu X., Koiwa H. One-step casting of Laemmli discontinued sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis gel // *Analytical biochemistry*. 2012. Vol. 421, no. 1. Pp. 347–349.
20. Миронов А.А., Комиссарчик Я.Ю., Миронов В.А. Методы электронной микроскопии в биологии и медицине. СПб, 1994. 400 с.

Поступила в редакцию 23 мая 2025 г.

После переработки 4 сентября 2025 г.

Принята к публикации 16 октября 2025 г.

Rakhimova Sh.Kh.^{1*}, Olimova H.N.¹, Kurbanov U.Kh.¹, Abraeva Z.Ch.², Mukarramov N.I.³, Abdurakhmanov J.M.¹, Sagdullaev Sh.Sh.¹ PHYSICOCHEMICAL STUDY OF PROTEIN COMPONENTS OF THE PLANT *RINDERA CYCLODONTA*

¹ Institute of Plant Chemistry named after Academician S. Yu. Yunusov, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, st. Mirzo Ulugbeka, 77, Tashkent, 100170, Uzbekistan, shahnoza2380@mail.ru

² Alfraganus University, st. Yukori Karakamysh, 2A, Tashkent, 100190, Uzbekistan

³ Research Institute of Plant Quarantine and Protection, st. Babura, 4, Kibray District, Tashkent Region, 111215, Uzbekistan

For the first time, a comprehensive study was conducted on the proteins of the plant *Rindera cyclodonta* and the press cake remaining after alkaloid extraction. A comparative analysis was performed using methods such as polyacrylamide gel electrophoresis (PAGE), infrared spectroscopy, scanning electron microscopy (SEM), amino acid analysis, and elemental composition analysis. Structural and compositional changes in proteins after alkaloid removal were established, and features of the amino acid profile were identified. The obtained data expand the knowledge about the chemical composition of *R. cyclodonta* and can be used to assess the potential for utilizing plant raw materials.

The article presents results on the total protein content: 8.9% in sample I (initial plant material) and 6.7% in sample II (press cake after alkaloid extraction). Electrophoretic analysis of proteins in both *R. cyclodonta* samples was conducted using PAGE conditions. Differences in the molecular mass of protein fractions were found, confirming the presence of low-molecular-weight subunits and high-molecular-weight components. Additionally, amino acid analysis, IR spectroscopy, SEM, and elemental composition analysis were carried out. Amino acid analysis of samples I and II revealed quantitative differences in the concentrations of individual amino acids. The total amino acid content in the samples was 81.360 mg/g and 82.130 mg/g, respectively, indicating similar overall amino acid profiles; however, the distribution of specific amino acids varied significantly. Scanning electron microscopy revealed microstructural differences in the plant tissue surfaces. Sample I had a more ordered surface, while Sample II showed loose and less organized structures, which may correlate with differences in protein composition. An analysis of functional groups based on characteristic absorption bands was also performed. The data confirm the presence of biologically active compounds in the samples. This study helps characterize the chemical composition of the plant and contributes to further pharmacological analysis. Using energy-dispersive spectroscopy (EDS), the presence of both organic elements (C, O, N) and inorganic components (Ca, Mg, S, Fe, etc.) was established, reflecting structural features and the possible degree of protein mineralization. The comparative characterization of the two samples revealed differences in nitrogen, sulfur, and trace element contents, which may be due to tissue specificity and extraction methods.

Keywords: *Rindera cyclodonta*, proteins, press cake, amino acids, electrophoresis, IR spectroscopy, SEM, EDS, trace elements.

For citing: Rakhimova Sh.Kh., Olimova H.N., Kurbanov U.Kh., Abraeva Z.Ch., Mukarramov N.I., Abdurakhmanov J.M., Sagdullaev Sh.Sh. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 2, pp. 150–159. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260217366>.

References

1. El Shazly A., Witte L., *Phytochemistry Reviews*, 2014, vol. 6, no. 2, pp. 188–282.
2. Nowak R., Drozd M., Mendyk E., Lemieszek M., Rzeski W., Kisiel W., Gawlik-Dziki U. *Industrial Crops and Products*, 2016, vol. 83, no. 2, pp. 410–421.
3. Olimova Kh.N., Kurbanov U.K., Okmanov R.Y., Tashkhodzhaev B., Mukarramov N.I., Turaeva S.M. *Chemistry of Natural Compounds*, 2025, vol. 61, no. 4, pp. 748–754. <https://doi.org/10.1007/s10600-025-04748-6>.
4. Dresler S., Szymczak G., Wójcik M. *Pharmaceutical biology*, 2017, vol. 55, no. 1, pp. 691–695. <https://doi.org/10.1080/13880209.2016.1265986>.
5. Wink M. *Medicines*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 251–286.
6. Luebert F., Cecchi L., Frohlich M.W., Gottschling M., Williams C.M., Hasenstab-Lehman K.E., Weigend M. *Taxon*, 2016, vol. 65, no. 3, pp. 502–522. <https://doi.org/10.12705/653.5>.
7. Yin J. *Genetika*, 2022, vol. 54, no. 1, pp. 173–186. <https://doi.org/10.2298/GENSR2201173Y>.
8. Ahmad M., Zafar M., Sultana S., Khan M.A., Qureshi R., Arshad M., Khan M.A. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 2012, vol. 2, no. 3, pp. 1599–1603.
9. Ganos C., Aligiannis N., Chinou I., Naziris N., Chountoulesi M., Mroczek T., Graikou K. *Molecules*, 2020, vol. 25, no. 16, pp. 3625. <https://doi.org/10.3390/molecules25163625>.
10. Ghanbari H., Hamedeyazdan S., Ghanbari R., Alilou M., Delazar A., Ebrahimi S.N., Nazemiyeh H. *Pharmaceutical Sciences*, 2024, vol. 30, no. 3, pp. 312–331.
11. Yildirim H. *Phytotaxa*, 2019, vol. 427, no. 4, pp. 249–258.
12. Sharma A., Rawat I., Kumar D., Kumar R. *Cryobiology*, 2021, vol. 98, pp. 139–145. <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2020.11.014>.
13. Yao X., Liu H., Tabarestani M.S. *Caryologia*, 2021, vol. 74, no. 4, pp. 69–76. <https://doi.org/10.36253/caryologia-1380>.
14. Ermakov A.I. *Metody biokhimicheskogo analiza rasteniy*. [Methods of biochemical analysis of plants]. Moscow, 1982. 430 p. (in Russ.).
15. Mashkovskiy M.D., Babayan E.A. *Gosudarstvennaya farmakopeya* [State Pharmacopoeia]. Moscow, 1989, 392 p. (in Russ.).

* Corresponding author.

16. Cohen S.A., Strydom D.J. *Analytical biochemistry*, 1988, vol. 174, no. 1, pp. 1–16.
17. Vasil'yev A.V., Grinenko Ye.V., Shchukin A.O., Fedulina T.G. *Infrakrasnaya spektroskopiya organicheskikh i prirodnykh soedineniy: uchebnoye posobiye* [Infrared spectroscopy of organic and natural compounds: a tutorial]. St. Petersburg, 2007, 54 p. (in Russ.).
18. Carranza-Oropeza M.V., Sherrill A.W., Sanders J.R., Arce P.E., Giudici R.J. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, vol. 133, no. 40, pp. 1–9.
19. Wu X., Koiwa H. *Analytical biochemistry*, 2012, vol. 421, no. 1, pp. 347–349.
20. Mironov A.A., Komiisarchik Ya.Yu., Mironov V.A. *Metody elektronnoy mikroskopii v biologii i meditsine* [Methods of electron microscopy in biology and medicine]. St. Petersburg, 1994, 400 p. (in Russ.).

Received May 23, 2025

Revised September 4, 2025

Accepted October 16, 2025

Сведения об авторах

Рахимова Шахноза Хакимджановна – PhD, старший научный сотрудник лаборатории химии высокомолекулярных растительных веществ, shahnoza2380@mail.ru

Олимова Халима Нодир кизи – аспирант, olimovahalima28@gmail.com

Курбанов Уткир Халимович – PhD, старший научный сотрудник лаборатории химии алкалоидов, utkir.88.88@inbox.ru

Абраева Зухро Чориевна – PhD, старший научный сотрудник, z.abrayeva@afu.uz

Мукаррамов Нуридин Исомидинович – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, mnuriddin@rambler.ru

Абдурахманов Жалолiddин Мирджамильевич – PhD старший научный сотрудник, jaloliddin0919@gmail.ru

Сагдуллаев Шамансур Шахсаидович – доктор технических наук, академик, заведующий отделом технологии, директор, plant_inst@icps.org.uz

Information about authors

Rakhimova Shakhnoza Khakimjanovna – PhD, Senior Researcher, Laboratory of Chemistry of High-Molecular Plant Substances, shahnoza2380@mail.ru

Olimova Halima Nodir Kizi – Postgraduate Student, olimovahalima28@gmail.com

Kurbanov Utkir Khalimovich – PhD, Senior Researcher, Laboratory of Chemistry of Alkaloids, utkir.88.88@inbox.ru

Abraeva Zuhro Chorievna – PhD, Senior Researcher, z.abrayeva@afu.uz

Mukarramov Nuridin Isomidinovich – Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, mnuriddin@rambler.ru

Abdurakhmanov Jaloliddin Mirdzhamilievich – PhD, Senior Researcher, jaloliddina@gmail.com

Sagdullaev Shamansur Shakhsaidovich – Doctor of Technical Sciences, Academician, Head of the Technology Department, Director, plant_inst@icps.org.uz