

УДК 581.192:634.71

ОСОБЕННОСТИ АККУМУЛЯЦИИ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В РАСТЕНИЯХ *RUBUS CHAMAEMORUS* L.

© Л.В. Афанасьева*, Т.А. Аюшина

Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ, 670047, Россия, afan@ mail.ru

Исследование перспективных, не включенных в официальные фармакопейные списки растений, находящих применение в народной медицине и быту человека, является одним из актуальных направлений современного ресурсоведения. В работе рассмотрены особенности накопления и распределения микроэлементов (Mn, Fe, Zn, Cu, Cr, Pb, As, Co, Cd, Hg) в растениях *Rubus chamaemorus* L., произрастающих в разных типах болотных сообществ на предгорных террасах хребта Хамар-Дабан (Южное Прибайкалье). Содержание микроэлементов определяли атомно-абсорбционным методом с использованием спектрофотометра «AAnalyst 400 PerkinElmer» после микроволнового разложения растительного сырья. По величине накопления как в надземных, так и в подземных органах микроэлементы образуют следующий ряд: Mn>Fe>Zn>Cu>Cr>Pb>Co>Cd>As>Hg. Установлено, что для Fe, Cu, Cr, Pb, As, Hg характерным является акропetalный тип распределения в растениях, для Mn, Zn, Co, Cd – преимущественно базипetalный тип. Отмечен низкий уровень внутри- и межпопуляционной изменчивости концентрации микроэлементов в растениях *R. chamaemorus*. На основе коэффициентов накопления выделены элементы сильного накопления растениями из почвы – Zn, Cu, Cr, Cd, (Mn, Co в листьях и стеблях), а также слабого накопления и среднего захвата – Fe, Pb, As и Hg. Плоды *R. chamaemorus* могут быть рекомендованы в качестве дополнительного источника марганца, хрома и кобальта для профилактики микроэлементозов у различных категорий населения.

Ключевые слова: *Rubus chamaemorus*, микроэлементы, Южное Прибайкалье.

Для цитирования: Афанасьева Л.В., Аюшина Т.А. Особенности аккумуляции микроэлементов в растениях *Rubus chamaemorus* L. // Химия растительного сырья. 2025. №3. С. 219–227. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250315872>.

Введение

В последние десятилетия как в России, так и за рубежом отмечается увеличение спроса на растительное сырье, которое может быть использовано в фармацевтической, пищевой, косметической и других отраслях промышленности. Поэтому актуальным является не только изучение фармакопейных растений, но также поиск и всестороннее исследование перспективных, не включенных в официальные фармакопейные списки растений, находящих применение в народной медицине и быту человека.

Одним из таких растений является морошка приземистая (*Rubus chamaemorus* L., сем. Rosaceae), плоды которой занимают особое место в рационе и фитотерапии народов севера России и Фенноскандии. Они обладают потогонным, противомикробным, спазмолитическим действием, а благодаря высокому содержанию витаминов С, группы В, омега-3 и омега-6 жирных кислот, каротиноидов и бензойной кислоты они используются как поливитаминное и ранозаживляющее средство. Плоды также находят применение в фармацевтической и пищевой промышленности в качестве добавок биологически активных веществ. Цветы, листья, корневище *R. chamaemorus* обладают мочегонным, противовоспалительным, кровоостанавливающим, вяжущим и отхаркивающим действием [1, 2].

Следует отметить, что в скандинавских странах плоды *R. chamaemorus* широко используются, и поэтому вид культивируется на плантациях в промышленных масштабах [3]. В России, несмотря на значительный дикорастущий ресурсный потенциал, популярность *R. chamaemorus* намного ниже, особенно по сравнению с представителями рода *Vaccinium*. Связано это в основном с труднодоступностью мест произрастания и невысокой продуктивностью дикорастущих популяций *R. chamaemorus*.

Анализ научной литературы показал, что биохимический состав плодов *R. chamaemorus* довольно хорошо изучен [3–11]. Установлено, что основной группой вторичных метаболитов плодов *R. chamaemorus* являются полифенолы, среди которых преобладают эллаготанины и фенолкарбоновые кислоты. Именно

* Автор, с которым следует вести переписку.

высокой концентрацией полифенолов объясняется антиканцерогенная, антимутагенная, антиоксидантная и противомикробная активность плодов *R. chamaemorus*.

Не только плоды, но и листья *R. chamaemorus*, составляющие основную долю надземной фитомассы растений, демонстрируют высокую биологическую активность. Исследованию их биохимического состава посвящена серия работ [3, 11, 12]. В частности, обнаружено, что листья также содержат значительные концентрации полифенольных соединений. При определении их качественного состава отмечено преобладание гликозилированных производных флавоноидов, гидроксикоричной, галловой и эллаговой кислот, катехина и процианидинов, что предопределяет их высокую антиоксидантную активность.

Что касается элементного состава растений *R. chamaemorus*, то сведения об этом ограничены [13–18]. Учитывая перспективность использования *R. chamaemorus* в качестве лекарственного сырья, в том числе как источника микроэлементов, исследование их минерального состава важно для принятия решения о применении растений для лечения и профилактики микроэлементозов. При этом необходимы данные не только о количественном содержании химических элементов, но и об особенностях их накопления в зависимости от условий произрастания. Известно, что каждый химический элемент имеет свой диапазон безопасной концентрации, при котором происходит нормальное функционирование организма. Повышенные или пониженные концентрации как жизненно необходимых, так и токсичных элементов могут негативно влиять на накопление биологически активных веществ в лекарственных растениях. Поэтому с практической точки зрения важным представляется определение диапазона варьирования химических элементов в растениях *R. chamaemorus* в естественных условиях произрастания. Эти данные также необходимы при оценке качества растительного сырья, особенно при его сборе на антропогенно нарушенных территориях.

Данное исследование направлено на изучение особенностей накопления и распределения эссенциальных микроэлементов в растениях *R. chamaemorus* в зависимости от условий произрастания, чтобы дополнить сведения об их лекарственной ценности.

Экспериментальная часть

Объектом исследования служили растения *R. chamaemorus*. Это многолетнее травянистое длиннокорневищное растение, представленное в ценопопуляциях вегетативными или генеративными побегами высотой 10–20 см, связанными между собой корневищем, достигающим в длину несколько метров. В верхней части побега формируются ассимилирующие листья. Листовая пластинка пятилопастная слаборассеченная, шириной 5–10 см. Цветки белые, одиночные, расположены на длинных цветоносах, плод – многокостянка диаметром 4–5 мм [19].

Сбор растений *R. chamaemorus* осуществлялся в фазу полного созревания ягод (середина июля) на ключевых участках (КУ), заложенных на территории Южного Прибайкалья (предгорные террасы хребта Хамар-Дабан) по общепринятым методикам. Следует отметить, что, несмотря на обширный ареал распространения, условия произрастания *R. chamaemorus* не отличаются большим разнообразием. В Южном Прибайкалье, как и в европейской части России, ценопопуляции *R. chamaemorus* приурочены к сфагновым болотам и заболоченным сфагновым лесам. На исследуемой территории КУ были заложены на залесенных сфагновых болотах, где проективное покрытие *R. chamaemorus* варьировало от 30 до 50%. Их краткая характеристика дана в таблице 1.

На каждом КУ методом квадрата отбирали 20–30 генеративных растений, которые разделяли на отдельные органы: плоды, листья, стебли, корневище. Корневище очищали от видимых примесей, промывали в проточной, а затем в дистиллированной воде. Одновременно отбирали образцы почвы (торфяная олиготрофная почва) в корнеобитаемом горизонте (5–30 см). В лабораторных условиях образцы высушивали до воздушно-сухого состояния, после чего измельчали и просеивали.

В растительных и почвенных образцах определяли содержание эссенциальных микроэлементов (Mn, Fe, Zn, Cu, Co, Cr), а также микроэлементов, регламентируемых для оценки качества лекарственного (пищевого) сырья (As, Pb, Cd, Hg (ОФС 1.5.3.0009.15)) атомно-абсорбционным методом на спектрофотометре «AAnalyst 400 PerkinElmer». Подробная пробоподготовка растительных и почвенных образцов была описана нами ранее [20]. Для оценки интенсивности накопления химических элементов растениями *R. chamaemorus* из почвы вычисляли коэффициенты накопления (K_h) и корневого барьера (K_{kb}). Алгоритм их расчета и дифференциации также представлен в ранее опубликованных работах [20].

Статистическую обработку результатов проводили с использованием стандартных методов и пакета программ Statistica 8.0. Для оценки достоверности различий средних значений исследуемых показателей использовали непараметрический критерий Краскела-Уоллиса.

Обсуждение результатов

Сравнительный анализ распределения микроэлементов в надземных и подземных органах *R. chamaemorus* показал, что наибольшим содержанием железа, меди, хрома, мышьяка, свинца и ртути характеризуются корневища, причем аккумулируются эти элементы (кроме меди) по акропетальному типу, т.е. их концентрации постепенно снижаются в ряду корневища > стебли > листья > плоды (табл. 2). Для меди эта последовательность нарушается в результате большего накопления ее в плодах, по сравнению с вегетативными органами (корневища > плоды > листья > стебли). Подобная закономерность была отмечена нами ранее для плодов шиповника, особенно их семян, которые также аккумулировали медь [20]. Медь – это металл переменной валентности, который участвует во многих окислительно-восстановительных реакциях, поэтому, вероятно, играет важную роль в формировании плодов и семян. Кроме того, медь входит в состав ферментов полифенолоксидазы и аскорбатоксидазы (содержание меди 0.2–0.3%), участвующих в метаболизме фенольных соединений и аскорбиновой кислоты [21], которыми богаты плоды *R. chamaemorus*. Согласно литературным данным, содержание витамина С в плодах *R. chamaemorus* варьирует от 62 до 100 мг% [8, 14].

В листьях *R. chamaemorus* аккумулируется больше марганца, цинка, кобальта и кадмия. Плоды *R. chamaemorus* отличаются наименьшими концентрациями рассмотренных нами микроэлементов (за исключением меди), что может быть связано с существованием механизмов, регулирующих поступление элементов минерального питания в репродуктивные органы. Это предположение подтверждается данными расчета коэффициентов корневого барьера, отражающих различия в накоплении микроэлементов в генеративных и вегетативных органах растений по отношению к корневым системам (табл. 3). Обнаружено, что большая часть микроэлементов (железо, медь, хром, мышьяк, свинец и ртуть) поступает в надземную часть *R. chamaemorus* по барьерному типу, при этом значения $K_{\text{б}}$ железа, хрома, мышьяка, свинца и ртути постепенно увеличиваются в ряду плоды > листья > стебли, а меди – в ряду стебли > листья > плоды. Безбарьерно в вегетативную часть поступает марганец, цинк, кобальт и кадмий – наиболее низкие значения $K_{\text{б}}$ отмечены в листьях, причем марганец и кобальт безбарьерно могут поступать в генеративные органы, а для цинка и кадмия наблюдается барьерный тип поступления.

Таблица 1. Краткая характеристика ключевых участков

Ключевые участки (КУ)	Расположение	Краткая характеристика сообщества
КУ-1	Кабанский район Республики Бурятия, с.ш. 51.8956 в.д. 106.1494	Сосново-багульниково-сфагновое сообщество. Встречаются деревья <i>Pinus sylvestris</i> L., <i>Larix sibirica</i> Ledeb, <i>Betula pubescens</i> Ehrh., высотой 0.5–1.5 м, сомкнутость крон 0.1–0.2. Проективное покрытие <i>R. chamaemorus</i> 30%, травяно-кустарничкового яруса (ТКЯ) – 35%, доминируют <i>Ledum palustre</i> L., <i>Chamaedaphne calyculata</i> (L.) Moench., <i>Oxycoccus palustris</i> Pers. Мохово-лишайниковый покров образован сплошной дерниной сфагновых мхов с участием <i>Pleurozium schreberi</i> (Brid.) Mitt., <i>Dicranum</i> sp., <i>Polytrichum strictum</i> Brid.
КУ-2	Кабанский район Республики Бурятия, с.ш. 51.8772 в.д. 106.1187	Лиственнично-голубично-сфагновое сообщество. Встречаются деревья <i>L. sibirica</i> , <i>B. pubescens</i> , высотой 0.7–2.0 м, сомкнутость крон 0.1–0.2. Проективное покрытие <i>R. chamaemorus</i> 40%, ТКЯ – 25%, доминирует <i>Vaccinium uliginosum</i> L., <i>L. palustre</i> , <i>Ch. calyculata</i> , встречаются <i>O. palustris</i> , <i>Andromeda polifolia</i> L. Мохово-лишайниковый покров образован сплошной дерниной сфагновых мхов с участием <i>Pl. schreberi</i> , <i>Dicranum</i> sp., <i>P. strictum</i> .
КУ-3	Слюдянский район Иркутской области, с.ш. 51.4471 в.д. 104.5009	Сосново-багульниково-сфагновое сообщество. Встречаются деревья <i>P. sylvestris</i> , <i>B. pubescens</i> , высотой 1.5–2.0 м, сомкнутость крон 0.1–0.2. Проективное покрытие <i>R. chamaemorus</i> 30%, ТКЯ – 45%, доминируют <i>L. palustre</i> , <i>Ch. calyculata</i> , встречаются <i>Menyanthes trifoliata</i> L., <i>Eriophorum vaginatum</i> L. Мохово-лишайниковый покров образован сплошной дерниной сфагновых мхов с участием <i>Pl. schreberi</i> , <i>Dicranum</i> sp., <i>P. strictum</i> .
КУ-4	Слюдянский район Иркутской области, с.ш. 51.5259 в.д. 104.1083	Кедрово-кустарничково-сфагновое сообщество. Встречаются деревья <i>Pinus sibirica</i> Du Tour, <i>P. sylvestris</i> , <i>B. pubescens</i> , высотой 0.5–2.0 м, сомкнутость крон 0.1–0.2. Проективное покрытие <i>R. chamaemorus</i> 40%, ТКЯ – 50%, доминирует <i>V. uliginosum</i> , <i>L. palustre</i> , <i>Ch. calyculata</i> , встречаются <i>V. vitis-idaea</i> L., <i>O. palustris</i> , <i>A. polifolia</i> . Мохово-лишайниковый покров образован сплошной дерниной сфагновых мхов с участием <i>Pl. schreberi</i> , <i>Dicranum</i> sp., <i>P. strictum</i> .

Таблица 2. Содержание микроэлементов ($M \pm \delta$, мг/кг сухого вещества) в надземных и подземных органах растений *Rubus chamaemorus* и в почве

Ключевые участки (КУ)	Mn	Fe	Zn	Cu	Cr	Pb	Co	Cd	As	Hg
Плоды $Mn > Fe > Zn > Cu > Cr > Pb > Co > Cd > As > Hg$										
КУ-1	137 ^b ±16	68.4±9.8	47.2±5.6	10.5 ^b ±2.4	2.84±0.2	1.02±0.1	0.76 ^a ±0.1	0.18 ^{ab} ±0.1	0.10±0.1	0.02±0.01
КУ-2	155 ^a ±24	62.3±6.4	53.9±6.8	13.2 ^a ±1.8	2.66±0.1	1.12±0.2	0.82 ^a ±0.1	0.21 ^a ±0.1	0.08±0.1	0.02±0.01
КУ-3	148 ^{ab} ±18	74.4±5.6	57.1±5.5	14.1 ^a ±2.6	2.44±0.2	0.98±0.1	0.68 ^{ab} ±0.1	0.16 ^b ±0.1	0.08±0.1	0.02±0.1
КУ-4	165 ^a ±22	59.5±3.2	43.2±7.8	12.9 ^a ±2.2	2.85±0.1	0.84±0.1	0.64 ^b ±0.1	0.24 ^a ±0.1	0.09±0.1	0.02±0.2
<i>Cv, %</i>	8	10	13	12	7	11	12	12	10	8
Листья $Mn > Fe > Zn > Cu > Cr > Pb > Co > Cd > As > Hg$										
КУ-1	480 ^b ±14	81.1±11.2	73.3 ^{ab} ±6.4	5.2 ^b ±1.8	3.79±0.3	1.07±0.1	0.82 ^{ab} ±0.1	0.35±0.1	0.11±0.1	0.04±0.01
КУ-2	618 ^a ±16	76.6±6.4	72.6 ^{ab} ±7.8	6.4 ^{ab} ±1.2	3.12±0.2	1.28±0.1	0.98 ^a ±0.1	0.48±0.1	0.14±0.1	0.04±0.01
КУ-3	444 ^b ±24	88.4±8.8	85.3 ^a ±9.2	7.3 ^a ±2.2	4.08±0.1	1.16±0.1	0.74 ^b ±0.1	0.42±0.1	0.12±0.1	0.05±0.01
КУ-4	526 ^{ab} ±12	78.9±7.6	68.2 ^b ±7.4	6.7 ^a ±2.4	3.69±0.2	1.34±0.1	0.77 ^b ±0.1	0.36±0.1	0.14±0.1	0.04±0.01
<i>Cv, %</i>	15	6	10	14	11	10	13	15	12	11
Стебли $Mn > Fe > Zn > Cr > Cu > Pb > Co > Cd > As > Hg$										
КУ-1	184±22	84.6±5.4	72.4±8.9	4.4 ^b ±1.1	4.03 ^{ab} ±0.3	1.58 ^a ±0.1	0.56±0.1	0.34±0.1	0.14±0.1	0.06±0.01
КУ-2	225±18	86.6±6.6	68.5±6.8	4.8 ^{ab} ±1.6	3.68 ^b ±0.2	1.41 ^a ±0.1	0.76±0.1	0.44±0.1	0.16±0.1	0.07±0.01
КУ-3	189±26	99.9±4.8	72.4±8.2	5.8 ^a ±1.2	4.56 ^a ±0.2	1.24 ^b ±0.1	0.58±0.1	0.37±0.1	0.18±0.1	0.05±0.01
КУ-4	204±38	88.8±5.2	61.1±5.4	5.6 ^a ±1.8	4.25 ^{ab} ±0.2	1.48 ^a ±0.1	0.54±0.1	0.49±0.1	0.14±0.1	0.06±0.01
<i>Cv, %</i>	9	10	10	13	9	11	9	11	12	14
Корневища $Mn > Fe > Zn > Cr > Cu > Pb > Co > Cd > As > Hg$										
КУ-1	127 ^{ab} ±8.8	91.1 ^b ±6.8	66.9 ^a ±6.3	11.4 ^b ±2.4	4.23±0.4	1.76±0.1	0.38±0.1	0.29±0.1	0.28±0.1	0.08±0.01
КУ-2	146 ^a ±9.2	102 ^a ±5.6	58.8 ^a ±5.2	14.2 ^{ab} ±2.8	4.76±0.8	1.84±0.1	0.47±0.1	0.33±0.1	0.32±0.1	0.09±0.01
КУ-3	114 ^b ±6.6	116 ^a ±8.4	63.3 ^a ±2.8	14.7 ^a ±1.6	5.09±1.2	2.18±0.1	0.42±0.1	0.24±0.1	0.36±0.1	0.09±0.01
КУ-4	138 ^a ±6.2	97.5 ^{ab} ±8.2	48.1 ^b ±4.4	15.9 ^a ±1.2	4.96±0.6	1.96±0.1	0.36±0.1	0.28±0.1	0.30±0.1	0.08±0.01
<i>Cv, %</i>	10	10	14	15	8	9	12	12	10	7
Почва										
КУ-1	179±16.2	183±6.2	28.1 ^a ±2.2	2.24 ^b ±0.6	1.72 ^a ±0.2	3.10±0.1	0.42±0.1	0.19±0.1	0.48±0.1	0.14±0.01
КУ-2	155±14.8	199±5.4	21.8 ^b ±1.4	1.92 ^b ±0.5	1.16 ^b ±0.2	3.42±0.1	0.44±0.1	0.22±0.1	0.52±0.1	0.16±0.01
КУ-3	163±18.4	176±4.8	18.3 ^b ±1.6	2.34 ^b ±0.4	1.82 ^a ±0.3	3.16±0.1	0.50±0.1	0.20±0.1	0.44±0.1	0.18±0.01
КУ-4	154±16.2	204±8.8	19.8 ^b ±2.0	3.16 ^a ±0.6	1.54 ^{ab} ±0.2	2.52±0.1	0.48±0.1	0.26±0.1	0.36±0.1	0.16±0.01
<i>Cv, %</i>	7	7	19	19	18	12	8	8	15	17

Примечание: *разные буквы в одном столбце для каждого органа представляют статистически значимые различия между растительными сообществами ($p < 0.05$), где $a > b$

Последовательность микроэлементов в рядах накопления, построенных на основе средних концентраций, в плодах, листьях, стеблях и корнях идентична. При этом уровень варьирования абсолютных концентраций микроэлементов в разных органах *R. chamaemorus* не превышает 15%, что свидетельствует о слабой внутри- и межпопуляционной изменчивости. При сравнении содержания микроэлементов в растениях *R. chamaemorus* из разных мест произрастания для большей их части не было обнаружено достоверных различий между типами растительных сообществ. Следует отметить, что ряд авторов также приводят данные о низкой межпопуляционной вариабельности концентраций ряда макро- и микроэлементов в плодах и листьях *R. chamaemorus*, объясняя это схожестью условий произрастания ценопопуляций (низкий pH почвы 2.5–3.5, идентичная влажность и трофность болотных почв) [13, 16].

Поскольку тип почвы в рассматриваемых растительных сообществах был одинаков, а коэффициенты вариации микроэлементов в торфяниках изменились незначительно, то и значения коэффициентов накопления достоверно не отличались между типами сообществ. Из данных таблицы 4 видно, что к элементам сильного накопления в *R. chamaemorus* относятся цинк, медь, хром, кадмий ($K_n > 1$), тогда как железо, свинец, мышьяк и ртуть слабо накапливаются растениями. Марганец относится к элементам сильного накопления в листьях и стеблях, кобальт – в плодах, листьях и стеблях.

При оценке возможности использования растений *R. chamaemorus* в качестве потенциальных источников биологически важных микроэлементов установлено, что 100 г свежих плодов могут обеспечить суточную потребность организма человека в марганце, кроме и кобальте и 7–13% от суточной нормы железа, цинка и меди [22, 23] (табл. 5). Листья также могут быть источником микроэлементов: в 100 г сухих листьев содержится от 40 до 80% суточной нормы железа, цинка и меди, тогда как содержание марганца, хрома и кобальта

в 6–20 раз ее превосходит. Известно, что марганец является важнейшим биоэлементом и кофактором для многих ферментов (пируваткиназа, супероксиддисмутаза и ксантинооксидаза), участвующих в обмене углеводов, белков, липидов, а также антиоксидантных механизмах. Хром принимает участие в регуляции углеводного обмена, способствует уменьшению уровня глюкозы в крови. Этот элемент также оказывает антиоксидантное действие, увеличивая уровень липопротеинов высокой плотности и снижая уровень триглицеридов. Кобальт входит в состав витамина B₁₂ (цианокобаламина) (массовая доля кобальта составляет около 4%), который необходим для нормального функционирования нервной системы и процессов кроветворения. Последние исследования показали, что кобальт вызывает заметный и стабильный полицитемический ответ, поэтому содержащие его синтетические препараты, используют спортсмены в качестве эритропоэз-стимулирующих средств [24, 25]. Полученные данные свидетельствуют о том, что при более глубоком изучении плоды и листья *R. chamaemorus* могут быть использованы в качестве потенциального источника микроэлементов, в том числе входящих в состав кроветворного комплекса. Содержание токсичных элементов, нормируемых при оценке качества лекарственного растительного сырья, в исследуемых растениях не превышало предельно допустимых значений: Pb – 6.0 мг/кг, Cd – 1.0 мг/кг, As – 0.5 мг/кг, Hg – 0.1 мг/кг [26].

Таблица 3. Значения коэффициентов корневого барьера ($M \pm \delta$) в растениях *Rubus chamaemorus*

Элемент	Плоды	Листья	Стебли
Mn	0.87 ^a ±0.08	0.26 ^c ±0.01	0.66 ^b ±0.04
Fe	1.54 ^a ±0.14	1.25 ^b ±0.09	1.13 ^b ±0.04
Zn	1.18 ^a ±0.15	0.74 ^b ±0.06	0.83 ^b ±0.08
Cu	1.11 ^b ±0.08	2.19 ^a ±0.16	2.72 ^a ±0.21
Cr	1.79 ^a ±0.24	1.32 ^b ±0.17	1.16 ^b ±0.12
Pb	1.97 ^a ±0.35	1.61 ^b ±0.21	1.39 ^c ±0.25
Co	0.56 ^{ab} ±0.05	0.49 ^b ±0.05	0.67 ^a ±0.04
Cd	1.46 ^a ±0.21	0.71 ^b ±0.09	0.67 ^b ±0.12
As	3.65 ^a ±0.37	2.42 ^b ±0.37	2.03 ^b ±0.07
Hg	3.87 ^a ±0.62	2.01 ^b ±0.18	1.44 ^c ±0.28

Примечание: *здесь и в таблице 4 разные буквы в одном ряду представляют статистически значимые различия между органами ($p < 0.05$), где a > b > c

Таблица 4. Значения коэффициентов накопления ($M \pm \delta$) в растениях *Rubus chamaemorus*

Элемент	Плоды	Листья	Стебли	Корневище
Mn	0.94 ^c ±0.09	3.21 ^a ±0.62	1.21 ^b ±0.07	0.81 ^c ±0.11
Fe	0.35 ^b ±0.05	0.43 ^{ab} ±0.06	0.47 ^a ±0.06	0.54 ^a ±0.04
Zn	2.36 ^b ±0.52	3.71 ^a ±0.74	3.38 ^a ±0.67	2.74 ^{ab} ±0.82
Cu	5.38 ^a ±0.76	2.71 ^b ±0.35	2.18 ^b ±0.03	5.92 ^a ±0.03
Cr	1.79 ^b ±0.55	2.43 ^{ab} ±0.24	2.73 ^a ±0.18	3.15 ^a ±0.29
Pb	0.33 ^c ±0.03	0.41 ^b ±0.08	0.48 ^b ±0.08	0.66 ^a ±0.12
Co	1.59 ^{ab} ±0.18	1.81 ^a ±0.33	1.34 ^b ±0.16	0.89 ^c ±0.07
Cd	0.89 ^c ±0.06	1.92 ^a ±0.42	1.92 ^a ±0.22	1.32 ^b ±0.12
As	0.24 ^b ±0.06	0.29 ^{ab} ±0.08	0.35 ^b ±0.09	0.71 ^a ±0.09
Hg	0.17 ^c ±0.04	0.25 ^c ±0.04	0.41 ^b ±0.04	0.65 ^a ±0.08

Таблица 5. Содержание химических элементов в плодах *R. chamaemorus* из разных мест произрастания

Элемент	Рекомендуемая суточная норма (мг/день/человек) [22, 23]	мг/100 г сырого вещества			мг/кг сухого вещества			
		Данные авторов	Польша [13]	Финляндия [13]	Данные авторов	Красноярский край [14]	Кольский п-ов [18]	Республика Коми [17]
Mn	2.5	2.9±0.2	0.63	0.59	151.6±11.3	107	...	71–130
Fe	10	1.2±0.1	0.28	0.25	66.14±6.72	27.01	...	35–55
Zn	12	0.9±0.1	0.33	0.35	50.38±6.31	9.11	...	18–40
Cu	1.5	0.2±0.06	0.05	0.07	12.68±1.54	6.42	11	1.2–5.4
Cr	0.05	0.05±0.01	0.012	0.011	2.71±0.19	0.09	0.3	0.3–0.7
Pb	...	0.02±0.01	0.018	0.007	0.99±0.11	0.03	0.3	...
Co	0.01	0.01±0.01	...	...	0.73±0.08	0.02	0.14	...
Cd	...	0.003±0.001	0.023	0.011	0.18±0.02	0.02	0.07	...
As	...	0.001±0.001	...	...	0.08±0.01	<0.006	0.05	...
Hg	...	0.0004±0.0001	...	...	0.02±0.01	...	...	...

Примечание: ... – данные отсутствуют

Как уже было отмечено, элементный состав растений *R. chamaemorus* слабо изучен, лишь небольшое количество работ посвящено анализу макро- и микроэлементного состава плодов или листьев этого растения [13–18]. При сравнении полученных нами данных с приводимыми в научной литературе обнаружено, что концентрация марганца, железа и цинка в свежих плодах *R. chamaemorus* сопоставимы с территорией Республики Коми, а меди – Кольского п-ова. На остальных территориях уровень микроэлементов в плодах был значительно ниже, чем Прибайкалье, хотя ряды накопления аналогичны построенным нами (табл. 5). На наш взгляд, отмеченные различия могут быть обусловлены условиями произрастания (разный состав сфагновых мхов, участвующих в формировании верхнего торфяного горизонта болотных почв, минерализация болотной воды). Так, в работе [17] показано, что на европейском северо-востоке России содержание макро- и микроэлементов в плодах *R. chamaemorus* снижается в 1.5–2.0 раза при продвижении от подзоны средней тайги к подзоне южных гиперарктических тундр. Кроме того, в работе [13] приводятся данные для коммерческих растений, т.е. выращенных на промышленных плантациях, что также может влиять на их элементный состав.

Заключение

В ходе проведенных исследований были определены средние концентрации эссенциальных (Mn, Fe, Zn, Cu, Cr, Co), а также токсичных микроэлементов (As, Pb, Cd, Hg) в растениях *R. chamaemorus*, произрастающих на территории Южного Прибайкалья.

Относительно низкий уровень варьирования абсолютных концентраций микроэлементов в разных органах *R. chamaemorus* свидетельствует о слабой внутри- и межпопуляционной изменчивости.

На основе коэффициентов накопления выделены элементы сильного накопления растениями из почвы – цинк, медь, хром, кадмий и слабого накопления и среднего захвата – железо, свинец, мышьяк и ртуть. Марганец относится к элементам сильного накопления в листьях и стеблях и слабого накопления и среднего захвата в плодах и корневище; кобальт – сильного накопления в плодах, листьях и стеблях и слабого накопления и среднего захвата в корневищах.

Плоды *R. chamaemorus* могут быть рекомендованы в качестве дополнительного источника марганца, хрома и кобальта для профилактики микроэлементозов у различных категорий населения.

Финансирование

Работа выполнена в рамках проекта № гос. регистрации 121030900138-8.

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. Дикорастущие полезные растения России / отв. ред. А.Л. Буданцев, Е.Е. Лесиовская. СПб, 2001. 663 с.
2. Rocabado G.O., Bedoya L.M., Abad M.J., Bermejo P. Rubus – a review of its phytochemical and pharmacological profile // Natural product communications. 2008. Vol. 3 (3). Pp. 423–436. <https://doi.org/10.1177/1934578X0800300319>.
3. Страх Я.Л., Игнатовец О.С. Химический состав и биологическая активность метаболитов *Rubus chamaemorus* L. // Вес Нац акад навук Беларусі. Сер. біял навук. 2022. Т. 67, №3. С. 321–331.
4. Thiem B. *Rubus chamaemorus* L. – a boreal plant rich in biologically active metabolites: a review // Biol. Lett. 2003. Vol. 40, no. 1. Pp. 3–13.
5. Määttä-Riihinen K.R., Kamal-Eldin A., Törrönen A.R. Identification and quantification of phenolic compounds in berries of *Fragaria* and *Rubus* species (family Rosaceae) // J. Agric. Food Chem. 2004. Vol. 52. Pp. 6178–6187. <https://doi.org/10.1021/jf049450r>.
6. Головко Т.К., Дымова О.В., Лашманова Е.А., Кузиванова О.А. Содержание и состав желтых пигментов в плодах морошки и черники в условиях среднетаежной зоны европейской части России // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, №1(4). С. 813–816.
7. Вогулкин К.Э., Вогулкина Н.В., Шандрикова Л.Н. Субарктический вид *Rubus chamaemorus* L. на южной и северной границах своего ареала // Вестник ВГУ. 2011. №6 (66). С. 26–34.

8. Jaakkola M., Korpelainen V., Hoppula K., Virtanen V. Chemical composition of ripe fruits of *Rubus chamaemorus* L. grown in different habitats // Journal of the science of food and agriculture. 2012. Vol. 92. Pp. 1324–1330. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4705>.
9. Kähkönen M., Kylli P., Ollilainen V., Salminen J., Heinonen M. Antioxidant activity of isolated ellagitannins from red raspberries and cloudberrries // J. Agric. Food Chem. 2012. Vol. 60. Pp. 1167–1174. <https://doi.org/10.1021/jf203431g>.
10. Puupponen-Pimiä R., Nohynek L., Suvanto J., Salminen J.-P., Seppänen-Laaks T., Tähtiharju J., Honkapää K., Oksman-Caldentey K.-M. Natural antimicrobials from Cloudberry (*Rubus chamaemorus*) seeds by sanding and hydrothermal extraction // ACS Food Sci Technol. 2021. Vol. 1. Pp. 917–927. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.0c00109>.
11. Faleva A.V., Ul'yanovskii N.V., Onuchina A.A., Falev D.I., Kosyakov D.S. Comprehensive characterization of secondary metabolites in fruits and leaves of cloudberry (*Rubus chamaemorus* L.) // Metabolites. 2023. 13(5). 598. <https://doi.org/10.3390/metabo13050598>.
12. Уэйли А.К. Фитохимический анализ листьев морошки обыкновенной (*Rubus chamaemorus* L.): автореф. дис. ... канд. фарм. наук. СПб, 2021. 23 с.
13. Adamczuk N., Ośko J., Grembecka M., Konieczyński P., Migas P., Orzel A., Baj-Wójtowicz B., Krauze-Baranowska M. Evaluation of the content of micro- and macroelements in raspberries depending on the species, cultivar variety, and geographical environment // Nutrients. 2023. Vol. 15. 3782. <https://doi.org/10.3390/nu15173782>.
14. Шароглазова Л.П. Комплексная переработка ягод морошки приземистой (*Rubus chamaemorus*), произрастающей на территории Красноярского края: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 2018. 24 с.
15. Ryzhakova N.K., Babeshina L.G., Kondratyeva A.D., Sechnaya D.Y. Contents of macro-, microelements and long-lived radionuclides in the medicinal plants belonging to the wetland community of Siberian region, Russia // Phytochemistry letters. 2017. Vol. 22. Pp. 280–286. <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2017.10.001>.
16. Abolina L., Osvalde A., Karlsons A. Habitat characteristics and mineral nutrition status of *Rubus chamaemorus* L. in Latvia // Plants. 2023. Vol. 12. 528. <https://doi.org/10.3390/plants12030528>.
17. Матистов Н.В., Валуйских О.Е., Ширшова Т.И. Химический состав и содержание микронутриентов в плодах морошки (*Rubus chamaemorus* L.) на европейском северо-востоке России // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2012. №1(9). С. 41–45.
18. Barcan V.S., Kovnatsky E.F., Smetannikova M.S. Absorption of heavy metals in wild berries and edible mushrooms in an area Affected by smelter emissions // Water, air and soil pollution. 1998. Vol. 103. Pp. 173–195. <https://doi.org/10.1023/A:1004972632578>.
19. Косицын А.Н. Морошка: биология, ресурсный потенциал, введение в культуру. М., 2001. 85 с.
20. Афанасьева Л.В., Аюшина Т.А. Особенности накопления и распределения микроэлементов в растениях *Rosa acicularis*, *Rosa davurica* и *Rosa rugosa* // Химия растительного сырья. 2021. №2. С. 209–216. <https://doi.org/10.14258/jcprtm.2021027440>.
21. Битюцкий Н.П. Микроэлементы высших растений. 2-е изд. СПб., 2020. 368 с.
22. Методические рекомендации № 2.3.1.1915-04. Рекомендуемые уровни потребления пищевых и биологически активных веществ. М., 2004. 32 с.
23. Здоровье России: атлас / под ред. Л.А. Бокерия. М., 2007. 254 с.
24. Lippi G., Franchini M., Guidi G.C. Blood doping by cobalt. Should we measure cobalt in athletes? // J. Occup. Med. Toxicol. 2006. Vol. 1. 18. <https://doi.org/10.1186/1745-6673-1-18>.
25. Пронина И.В., Мочалова Е.С., Ефимова Ю.А., Постников П.В. Биологические функции кобальта, токсикология и обнаружение в антидопинговом контроле // Тонкие химические технологии. 2021. №16(4). С. 318–336.
26. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. М., 2001. 180 с.

Поступила в редакцию 24 сентября 2024 г.

После переработки 25 ноября 2024 г.

Принята к публикации 5 декабря 2024 г.

Afanas'yeva L.V.*, Ayushina T.A. FEATURES OF MICROELEMENTS ACCUMULATION IN *RUBUS CHAMAEMORUS* L.

Institute of General and Experimental Biology SB RAS, st. Sakyanovoy, 6, Ulan-Ude, 670047, Russia, afanl@mail.ru

One of the main tasks of modern resource science is to study potential plants that are used in folk medicine and daily life, but are not included in official pharmacopoeia lists. The features of accumulation and distribution of microelements (Mn, Fe, Zn, Cu, Cr, Pb, As, Co, Cd and Hg) in *Rubus chamaemorus* growing in various types of marsh communities in the South Baikal region were studied. The content of microelements was determined by the atomic absorption method using the AAnalyst 400 PerkinElmer spectrophotometer after microwave decomposition of plant materials. In accordance with absolute values, both in aboveground and underground organs, microelements form the following row: Mn>Fe>Zn>Cu>Cr>Pb>Co>Cd>As>Hg. It was found that the acropetal distribution type in plants is characteristic for Fe, Cu, Cr, Pb, As and Hg, whereas the basipetal distribution type is predominantly characteristic for Mn, Zn, Co and Cd. Low level of intra- and interpopulation variability of microelement concentrations in *R. chamaemorus* plants was observed. On the basis of accumulation coefficients, elements with strong accumulation by plants from the soil were identified – Zn, Cu, Cr, Cd (Mn, Co in leaves and stems), as well as elements with weak accumulation – Fe, Pb, As and Hg. The berries of *R. chamaemorus* can be recommended as an additional source of Mn, Cr and Co for the prevention of microelementoses in various categories of the population.

Keywords: *Rubus chamaemorus*, microelements, Southern Baikal region.

For citing: Afanas'yeva L.V., Ayushina T.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2025, no. 3, pp. 219–227. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250315872>.

References

1. *Dikorastushchiye poleznyye rasteniya Rossii* [Wild useful plants of Russia], ed. A.L. Budantsev, Ye.Ye. Lesiovskaya. St. Petersburg, 2001, 663 p. (in Russ.).
2. Rocabado G.O., Bedoya L.M., Abad M.J., Bermejo P. *Natural product communications*, 2008, vol. 3 (3), pp. 423–436. <https://doi.org/10.1177/1934578X0800300319>.
3. Strakh Ya.L., Ignatovets O.S. *Vies Nac akad navuk Bielarusi. Sier. bijal navuk*, 2022, vol. 67, no. 3, pp. 321–331. (in Russ.).
4. Thiem B. *Biol. Lett.*, 2003, vol. 40, no. 1, pp. 3–13.
5. Määttä-Riihin K.R., Kamal-Eldin A., Törrönen A.R. *J. Agric. Food Chem.*, 2004, vol. 52, pp. 6178–6187. <https://doi.org/10.1021/jf049450r>.
6. Golovko T.K., Dymova O.V., Lashmanova Ye.A., Kuzivanova O.A. *Izvestiya Samarsko-go nauchnogo tsentra Rossijskoy akademii nauk*, 2011, vol. 13, no. 1(4), pp. 813–816. (in Russ.).
7. Vogulkina K.E., Vogulkina N.V., Shandrikova L.N. *Vestnik VGU*, 2011, no. 6 (66), pp. 26–34. (in Russ.).
8. Jaakkola M., Korpelainen V., Hoppula K., Virtanen V. *Journal of the science of food and agriculture*, 2012, vol. 92, pp. 1324–1330. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4705>.
9. Kähkönen M., Kylli P., Ollilainen V., Salminen J., Heinonen M. *J. Agric. Food Chem.*, 2012, vol. 60, pp. 1167–1174. <https://doi.org/10.1021/jf203431g>.
10. Puupponen-Pimiä R., Nohynek L., Suvanto J., Salminen J.-P., Seppänen-Laaks T., Tähtiharju J., Honkapää K., Oksman-Caldentey K.-M. *ACS Food Sci Technol.*, 2021, vol. 1, pp. 917–927. <https://doi.org/10.1021/acsfoodsctech.0c00109>.
11. Faleva A.V., Ul'yanovskii N.V., Onuchina A.A., Falev D.I., Kosyakov D.S. *Metabolites*, 2023, 13(5), 598. <https://doi.org/10.3390/metabolites13050598>.
12. Ueyli A.K. *Fitokhimicheskiy analiz list'yev moroshki obyknovennoy (Rubus chamaemorus L.): avtoref. dis. ... kand. farm. nauk.* [Phytochemical analysis of cloudberry leaves (*Rubus chamaemorus* L.): author's abstract. diss. ... candidate of pharm. sciences]. St. Petersburg, 2021, 23 p. (in Russ.).
13. Adamczuk N., Ośko J., Grembecka M., Konieczyński P., Migas P., Orzeł A., Baj-Wójtowicz B., Krauze-Baranowska M. *Nutrients*, 2023, vol. 15, 3782. <https://doi.org/10.3390/nu15173782>.
14. Sharoglozova L.P. *Kompleksnaya pererabotka yagod moroshki prizemistoy (Rubus chamaemorus), proizra-stayushchey na territorii Krasnoyarskogo kraya: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk.* [Complex processing of berries of the squat cloudberry (*Rubus chamaemorus*), growing in the territory of Krasnoyarsk Krai: author's abstract. diss. ... candidate of technical sciences]. Krasnodar, 2018, 24 p. (in Russ.).
15. Ryzhakova N.K., Babeshina L.G., Kondratyeva A.D., Sechnaya D.Y. *Phytochemistry letters*, 2017, vol. 22, pp. 280–286. <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2017.10.001>.
16. Abolina L., Osvalde A., Karlsons A. *Plants*, 2023, vol. 12, 528. <https://doi.org/10.3390/plants12030528>.
17. Matistov N.V., Valuyskikh O.Ye., Shirshova T.I. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN*, 2012, no. 1(9), pp. 41–45. (in Russ.).
18. Barcan V.S., Kovnatsky E.F., Smetannikova M.S. *Water, air and soil pollution*, 1998, vol. 103, pp. 173–195. <https://doi.org/10.1023/A:1004972632578>.
19. Kositsyn A.N. *Moroshka: biologiya, resursnyy potentsial, vvedeniye v kul'turu.* [Cloudberry: biology, resource potential, introduction to culture]. Moscow, 2001, 85 p. (in Russ.).

* Corresponding author.

20. Afanas'yeva L.V., Ayushina T.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2021, no. 2, pp. 209–216. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021027440>. (in Russ.).
21. Bityutskiy N.P. *Mikroelementy vysshikh rasteniy. 2-ye izd.* [Microelements of Higher Plants. 2nd ed.]. St. Petersburg, 2020, 368 p. (in Russ.).
22. *Metodicheskiye rekomendatsii № 2.3.1.1915-04. Rekomenduyemye urovni potrebleniya pishchevykh i biologicheskikh aktivnykh veshchestv.* [Methodological recommendations No. 2.3.1.1915-04. Recommended levels of consumption of food and biologically active substances]. Moscow, 2004, 32 p. (in Russ.).
23. *Zdorov'ye Rossii: atlas* [Health of Russia: atlas], ed. L.A. Bokeriya. Moscow, 2007, 254 p. (in Russ.).
24. Lippi G., Franchini M., Guidi G.C. *J. Occup. Med. Toxicol.*, 2006, vol. 1, 18. <https://doi.org/10.1186/1745-6673-1-18>.
25. Pronina I.V., Mochalova Ye.S., Yefimova Yu.A., Postnikov P.V. *Tonkiye khimicheskiye tekhnologii*, 2021, no. 16(4), pp. 318–336. (in Russ.).
26. *SanPiN 2.3.2.1078-01. Gigiyenicheskiye trebovaniya bezopasnosti i pishchevoy tsennosti pishchevykh produktov.* [SanPiN 2.3.2.1078-01. Hygienic requirements for the safety and nutritional value of food products]. Moscow, 2001, 180 p. (in Russ.).

Received September 24, 2024

Revised November 25, 2024

Accepted December 5, 2024

Сведения об авторах

Афанасьева Лариса Владимировна – старший научный сотрудник, afanl@mail.ru
Аюшина Туяна Аюшиевна – старший научный сотрудник, tuyana2602@mail.ru

Information about authors

Afanasyeva Larisa Vladimirovna – Senior Researcher, afanl@mail.ru
Ayushina Tuyana Ayushievna – Senior Researcher, tuyana2602@mail.ru