

УДК 581.192

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В ПЛОДОВО-ЯГОДНЫХ РАСТЕНИЯХ, КУЛЬТИВИРУЕМЫХ В ОКРЕСТНОСТЯХ Г. ЗЕЛЕНОГОРСКА КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

© *А.В. Обухова^{1*}, В.И. Отмахов¹, И.В. Шилова², Ю.С. Саркисов³, А.Е. Янюк¹, Е.В. Петрова¹*

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, Томск, 634050 (Россия),
e-mail: nastyuffka201095@gmail.com*

² *Научно-исследовательский институт фармакологии и регенеративной медицины имени Е.Д. Гольдберга ТНИМЦ РАН, пр. Ленина, 3, Томск, 634028 (Россия)*

³ *Томский государственный архитектурно-строительный университет, пл. Соляная, 2/8, Томск, 634003 (Россия)*

Цель исследования – выявление особенностей элементного состава ягод (плодов) и листьев малины обыкновенной (*Rubus idaeus* L.), рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.), смородины черной (*Ribes nigrum* L.), вишни обыкновенной (*Cerasus vulgaris* L.), ирги обыкновенной (*Amelanchier ovalis* Medik.), собранных в окрестностях г. Зеленогорска Красноярского края, с оценкой возможностей применения как источников элементов, экологической безопасности использования, а также закономерностей распределения элементов между растениями, почвой и окружающей средой. Элементный состав изучали после озоления с помощью метода дуговой атомно-эмиссионной спектроскопии с многоканальным анализатором эмиссионных спектров (ДАЭС с МАЭС). В результате в золе исследуемых растений определено наличие 30 элементов, 25 из которых относят к микроэлементам, а 22 являются (условно) эссенциальными. Установлена принадлежность минимальных экстремумов содержания в большинстве нечетным порядковым номерам элементов в таблице Д.И. Менделеева, а максимальных – четным. Выявленные закономерности предложено представить в виде комбинаций экстремумов с соответствующими порядковыми номерами атомов, что наглядно указывает на способность растения концентрировать определенные химические элементы. По степени накопления из почвы, свидетельствующей о способности растений аккумулировать элементы, максимальным показателем для всех исследуемых видов и их сырья выступает К, для всех видов сырья малины и смородины – Са, для листьев с ягодами (плодами) вишни, малины и отдельно для плодов вишни – Mg, только для листьев с ягодами малины и смородины – Ti, для листьев с ягодами смородины – Sr и Ag. В рядах биологического поглощения элементов в исследовании по градации «сильное накопление» выделяются лишь Ti и Ag, в то время как остальные являются обычными для растительности. Наивысшей биогеохимической активностью из изучаемых плодово-ягодных видов характеризуется малина (независимо от сырья), а далее следует смородина. Показано, что сырье «листья+ягоды (плоды)» во всех исследуемых случаях содержит намного больше микроэлементов, в отличие от отдельных ягод (плодов). Исследование показало возможность применения вышеуказанных образцов растений в качестве источников макро- и микроэлементов, включая эссенциальные.

Ключевые слова: элементный состав, дуговая атомно-эмиссионная спектроскопия, эссенциальные элементы, малина обыкновенная, рябина обыкновенная, смородина черная, вишня обыкновенная, ирга обыкновенная, распределение элементов.

Введение

Город Зеленогорск Красноярского края представляет собой урбанизированную территорию в лесном массиве Канской лесостепи, находящейся в Канско-Рыбинской котловине. Непосредственно в районе исследования – п. Орловка располагаются лесостепные пространства. Растительный мир этой зоны характеризуется разнообразием видов растений, многие из которых нашли широкое применение в медицине и сельском хозяйстве [1]. К ним относятся,

Обухова Анастасия Валерьевна – аспирант,
e-mail: nastyuffka201095@gmail.com

Отмахов Владимир Ильич – доктор технических наук,
профессор кафедры аналитической химии,
e-mail: otmahov2004@mail.ru

Окончание на С. 290.

Орловка располагаются лесостепные пространства. Растительный мир этой зоны характеризуется разнообразием видов растений, многие из которых нашли широкое применение в медицине и сельском хозяйстве [1]. К ним относятся,

* Автор, с которым следует вести переписку.

в частности, широко культивируемые в окрестностях города плодово-ягодные виды, являющиеся преимущественно представителями семейства розоцветных (*Rosaceae* Juss.): малина обыкновенная – *Rubus idaeus* L., рябина обыкновенная – *Sorbus aucuparia* L., смородина черная – *Ribes nigrum* L., вишня обыкновенная – *Cerasus vulgaris* L., ирга обыкновенная – *Amelanchier ovalis* Medik.

Объекты растительного происхождения выступают естественными источниками макро- и микроэлементов, включая жизненно необходимые (эссенциальные) [2]. В растениях элементы образуют комплексные и металлорганические соединения, что определяет их функциональную активность, способствует лучшей усвояемости живым организмом [1]. Изучение элементного состава актуально в связи с воздействием техногенных факторов загрязнения окружающей среды [3–6]. Кроме того, большой теоретический и практический интерес представляет изучение видовой специфичности растений по составу и количественному содержанию элементов. Поэтому элементный состав следует рассматривать как важную составную часть растительного материала.

Цель настоящего исследования – выявление особенностей элементного состава ягод (плодов) и листьев плодово-ягодных растений, собранных в окрестностях г. Зеленогорска Красноярского края, с оценкой возможностей применения объектов исследования в качестве источников элементов и экологической безопасности их использования, а также закономерностей распределения химических элементов между растениями, почвой и окружающей средой.

Экспериментальная часть

Сбор сырья (ягоды (плоды), листья) плодово-ягодных растений малины обыкновенной – *Rubus idaeus* L., рябины обыкновенной – *Sorbus aucuparia* L., смородины черной – *Ribes nigrum* L., вишни обыкновенной – *Cerasus vulgaris* L. и ирги обыкновенной – *Amelanchier ovalis* Medik. осуществляли в фазу плодоношения в августе 2020 г. на собственном приусадебном участке в п. Орловка ЗАТО г. Зеленогорска Красноярского края. Высушенное воздушным способом сырье измельчали и просеивали через сито с диаметром отверстий 1–2 мм (влажность 7.6–9.3%). Параллельно выполняли отбор образцов почвы в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84 [7] с последующей предварительной пробоподготовкой их в соответствии с ГОСТ Р ИСО 11463-2011 [8].

Исследование элементного состава образцов сырья и почвы проводили после озоления в муфельной печи при температуре 500 °С. Аналитические исследования химических элементов выполняли с помощью метода дуговой атомно-эмиссионной спектроскопии с многоканальным анализатором эмиссионных спектров (ДАЭС с МАЭС) на спектрометре «Гранд» (НПО «Оптоэлектроника», Россия) [9–12] на кафедре аналитической химии в лаборатории мониторинга окружающей среды (ЛМОС) аккредитованного испытательного центра «Томского регионального центра коллективного пользования» (ТРЦКП) (аттестат аккредитации RA.RU.21BO08 от 16.11.2017) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Полученные зольные остатки взвешивали, растирали в агатовой ступке до однородной порошкообразной смеси и разбавляли графитовым порошком последовательно в 10 и 100 раз. В работе использовали стандартные образцы состава графитового коллектора микропримесей СОГ–37 (ГСО 8487-2003, срок годности 60 лет) [13]. Навески проб, исследуемых и стандартных образцов массой 0.015 г помещали в кратер анодного электрода, затем для стабилизации условий возбуждения спектра микродозатором вводили 20 мкл легкоионизируемого носителя (раствор натрия хлорида на 95% этаноле с содержанием 5% масс. натрия). Катодом служил электрод, заточенный на конус (в работе использовали графитовые электроды для спектрального анализа ОСЧ-7-4). Условия регистрации спектров: постоянный ток – 13 А; расстояние между электродами – 0.0032 м; время полной экспозиции – 20 с [14–18]. Для каждого вида исследуемых представителей

Шилова Инесса Владимировна – доктор фармацевтических наук, старший научный сотрудник, e-mail: nii@pharmso.ru

Саркисов Юрий Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры физики, химии и теоретической механики, e-mail: sarkisov@tsuab.ru

Янюк Алёна Евгеньевна – студент, e-mail: bloom201328@mail.ru

Петрова Елена Васильевна – кандидат химических наук, доцент кафедры аналитической химии, e-mail: elena1207@sibmail.com

плодово-ягодных растений по подгруппам «листья, ягоды (плоды)» и «ягоды (плоды)» рассчитывали коэффициент биологического поглощения (КБП) [19], характеризующий интенсивность поглощения элементов из почвы, как отношение содержания элемента в золе сырья растения к таковому в почве конкретного места его сбора. Биогеохимическую активность вида [19], характеризующую общую

способность конкретного вида к накоплению микроэлементов, оценивали, как сумму КБП элементов этого вида в золе растения. Результаты на рисунках представлены в виде медианы и пересчитаны на воздушно-сухую массу сырья исследуемых объектов.

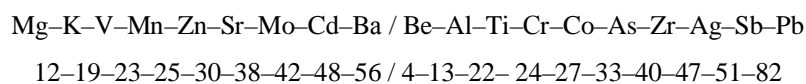
Результаты количественных определений подвергали математической обработке методом вариационной статистики. Число параллельных измерений для каждого исследуемого объекта равнялось 30, по которым рассчитывали медиану значений и в дальнейших исследованиях учитывали только ее значение.

Обсуждение результатов

С использованием метода ДАЭС с МАЭС в золе листьев с ягодами (плодами) и отдельно ягод (плодов) исследуемых плодово-ягодных растений: малины обыкновенной, рябины обыкновенной, смородины черной, вишни обыкновенной и ирги обыкновенной, определено наличие 30 элементов (рис.), 25 из которых относят к микроэлементам, а 22 являются (условно) эссенциальными [15].

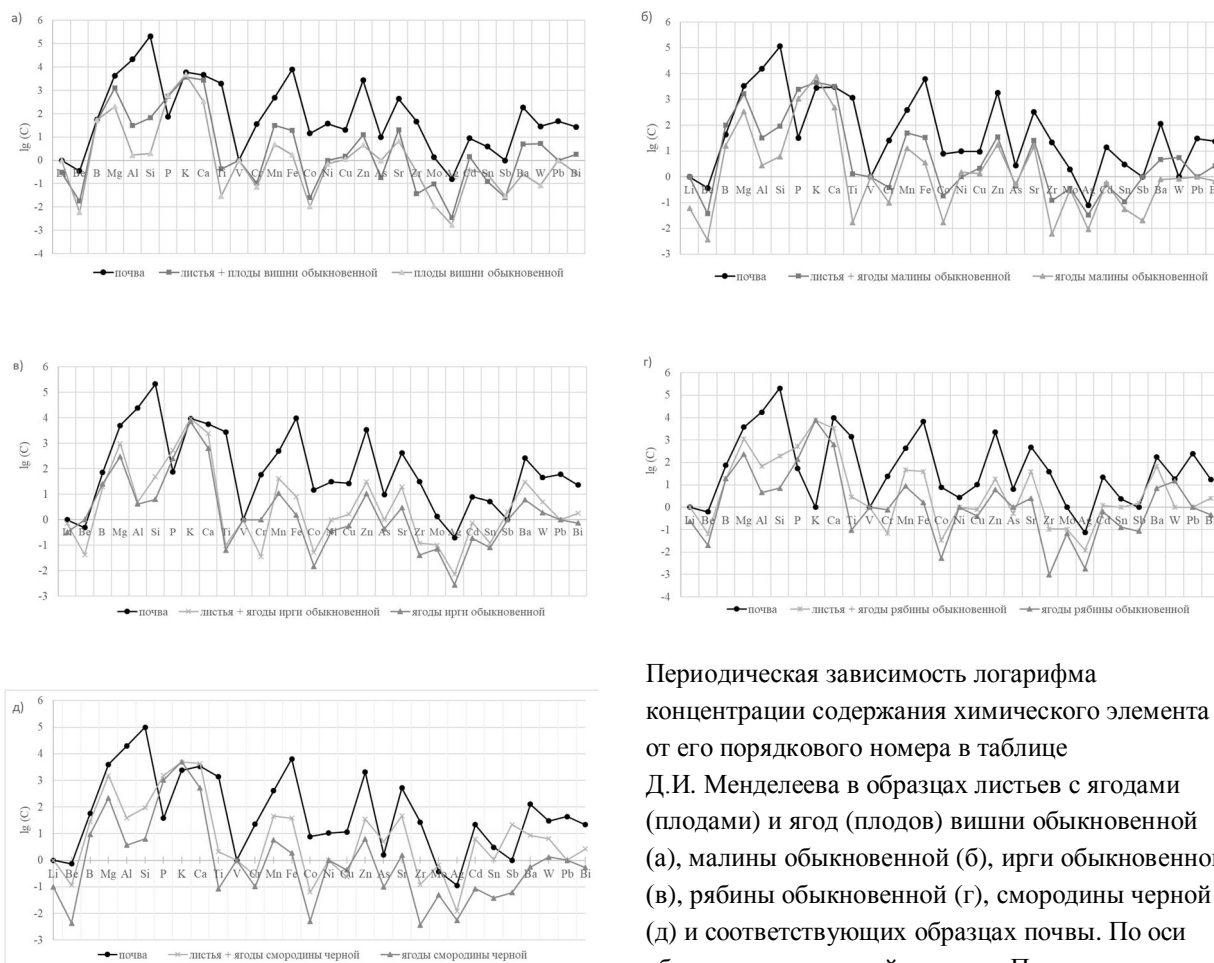
Полученные результаты анализа представлены в виде зависимостей логарифма концентрации (медианы) химического элемента от его порядкового номера в периодической системе Д.И. Менделеева (в порядке увеличения) (рис.), что позволяет наглядно показать качественный состав и отобразить количественное содержание химических элементов в исследуемых объектах, а также определить на кривых максимумы и минимумы содержания отдельных элементов.

Периодические зависимости (рис.) наглядно демонстрируют экстремумы, а именно максимальные и минимальные значения содержания отдельных химических элементов в исследуемых объектах. Интересным фактом является принадлежность минимальных экстремумов в большинстве нечетным порядковым номерам элементов в таблице Д.И. Менделеева, а максимальных – четным. Таким образом, некоторые закономерности можно записать в виде комбинаций экстремумов максимального и минимального значения с соответствующими им порядковыми номерами атомов (по степени увеличения), что можно описать как понятие «химические коды», позволяющие охарактеризовать способность растения концентрировать определенные химические элементы [16]. На примере периодических зависимостей логарифмов концентраций содержания химических элементов в образцах листьев с плодами вишни обыкновенной (рис. а) нами сформированы ряды, где цифрами в порядке увеличения обозначены порядковые номера элементов в таблице Д.И. Менделеева, в числителе приводятся резко выдающиеся точки в виде пика на кривой (экстремумы – максимумы), а в знаменателе аналогично экстремумы – минимумы. В результате для вишни обыкновенной (листья+плоды) получаются следующие ряды:



На основании выявленных закономерностей можно предположить, что максимумы на кривой зависимостей логарифмов концентраций от порядкового номера элемента характеризуют наиболее устойчивое состояние и жизнеспособность растений в данных условиях среды обитания. Все исследуемые виды были полноценно развитые соответственно своему типу.

Полученные с помощью ДАЭС с МАЭС результаты изучения состава элементов образцов золы представителей плодово-ягодных растений подвергали дальнейшему анализу. Почва является основным источником химических элементов для флоры, а растения способны селективно усваивать и распределять химические элементы в ткани, а также на ее поверхности, что обусловлено особенностями развития и функционирования их органов и систем. Растения обладают высокой мобилизующей и аккумулирующей способностью в отношении химических элементов. Растительные виды выступают в посреднической роли в ряду почва – растение – животное – человек. Поэтому первоначально определяли геохимический показатель степени накопления – КБП (табл. 1), для выявления интенсивности поглощения отдельных элементов каждым исследуемым видом из почвы, что представляется важным для оценки природной миграции химических элементов. Кроме того, зачастую накопление конкретных элементов является специфичным для определенных семейств, родов или видов, например, для рода *Vaccinium* L. – Mn, *Capsicum* L. – Co, что определяется физиологическими, биохимическими процессами в клетках и тканях [20].



Периодическая зависимость логарифма концентрации содержания химического элемента от его порядкового номера в таблице Д.И. Менделеева в образцах листьев с ягодами (плодами) и ягод (плодов) вишни обыкновенной (а), малины обыкновенной (б), ирги обыкновенной (в), рябины обыкновенной (г), смородины черной (д) и соответствующих образцах почвы. По оси абсцисс – химический элемент. По оси ординат – логарифм концентрации (мкг/г)

Таблица 1. Коэффициенты биологического поглощения (КБП) элементов для сырья исследуемых плодово-ягодных растений

Элемент	Сырье, вид									
	Листья + ягоды (плоды)					Ягоды (плоды)				
	Вишня обыкновенная	Малина обыкновенная	Рябина обыкновенная	Ирга обыкновенная	Смородина черная	Вишня обыкновенная	Малина обыкновенная	Рябина обыкновенная	Ирга обыкновенная	Смородина черная
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
B	0.05	0.1	0.1	0.09	0.2	0.02	0.01	0.03	0.001	0.01
Mg	0.9	2.3	0.3	0.3	0.5	1.0	0.4	0.3	0.4	0.2
Al	0.3	0.5	0.3	0.2	0.4	0.05	0.1	0.06	0.06	0.05
Si	0.001	0.002	0.004	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
P	0.003	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
K	8.0	77	10	7.0	41	9.0	33	3.0	3.0	28
Ca	0.6	1.6	0.3	1.0	2.0	0.8	2.7	0.3	0.8	2.1
Ti	0.6	1.1	0.3	0.4	1.3	0.07	0.2	0.06	0.1	0.2
V	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Mn	0.003	0.02	0.003	0.001	0.01	0.002	0.004	0.03	0.001	0.005
Fe	0.07	0.1	0.1	0.08	0.1	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01
Co	0.002	0.005	0.006	0.001	0.006	0.002	0.001	0.002	0.002	0.003
Ni	0.002	0.02	0.004	0.004	0.008	0.007	0.002	0.007	0.001	0.001
Cu	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.02	0.2	0.1	0.01	0.1
Zn	0.07	0.2	0.08	0.06	0.02	0.06	0.1	0.04	0.02	0.04
As	0.005	0.02	0.008	0.009	0.02	0.002	0.01	0.003	0.003	0.003
Sr	0.02	0.2	0.08	0.3	3.1	0.2	0.19	0.15	0.04	0.06

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Zr	0.05	0.08	0.08	0.05	0.09	0.02	0.04	0.005	0.007	0.003
Mo	0.001	0.006	0.003	0.004	0.005	0.007	0.001	0.001	0.001	0.001
Ag	0.07	0.2	0.1	0.08	1.7	0.008	0.2	0.07	0.05	0.1
Cd	0.02	0.4	0.2	0.04	0.1	0.01	0.1	0.02	0.01	0.05
Sn	0.2	0.03	0.05	0.1	0.3	0.05	0.04	0.03	0.02	0.004
Sb	0.03	0.04	0.05	0.02	0.3	0.07	0.02	0.05	0.02	0.01
W	0.03	0.04	0.4	0.1	0.07	0.001	0.007	0.04	0.02	0.004
Pb	0.2	0.04	0.3	0.1	0.2	0.003	0.005	0.8	0.04	0.04

Ранжированные значения показателя КБП показывают особенности биологических циклов элементов в условиях данных ландшафтов, а также эвентуальную биогеохимическую подвижность элементов в них. Компоненты, КБП (табл. 1) которых превышает единицу, являются элементами биологического накопления. В нашем случае такими элементами выступили: К – для всех исследуемых растений и их сырья; Са – для всех видов сырья малины и смородины; Mg – для листьев с ягодами (плодами) вишни, малины и отдельно для плодов вишни; Ti – только для листьев с ягодами малины и смородины; Sr и Ag – для листьев с ягодами смородины. Для данных видов и этого сырья можно свидетельствовать о способности их аккумулировать указанные элементы.

В соответствии с рядами биологического поглощения элементов по А.И. Перельману [2] (табл. 2) к классу «энергичное накопление» (10n и более) следует отнести лишь К, причем исключительно для малины и смородины, как для листьев с ягодами, так и для только ягод, а также листьев с ягодами рябины. По градации «сильное накопление» (10-n) выходит также К для оставшихся видов (вишни, ирги и рябины). Селективное накопление химических элементов часто встречается в группах энергичного и сильного накопления. Как правило, это эссенциальные элементы, например, калий – принимает участие в процессах обмена веществ растений, регулирует состояние цитоплазмы клеток растений и является основным катионом клеточного сока растений [20]. Он накапливается преимущественно в молодых тканях с присущим им высоким уровнем обмена веществ и способен концентрироваться в паренхиматозных тканях, сетчатых трубках, точках роста и вторичных тканях, то есть коре. Для малины и смородины характерно наличие Са в случае всего сырья, а также Ti – для листьев с ягодами малины и смородины, дополнительно Mg – для малины, а Sr, Ag – для смородины. Кроме того, Mg – для плодов вишни, Са – для листьев с ягодами ирги. Среди элементов этих групп в нашем исследовании выделяются лишь Ti и Ag, в то время как остальные являются обычными. Предположительно, указанные химические элементы присутствуют в данных растениях в виде обменных, физически сорбируемых (на поверхности коллоидных мицелл, в составе поглощенных катионов) и связанных с органическими веществами форм. В случае образования комплексных соединений возрастает миграционная подвижность большинства элементов. Часто элементы вступают в комплексообразование с органическими соединениями (аддендами являются аминокислоты, гидроксикислоты, двуосновные кислоты, полифенолы, ароматические гидроксисоединения, гетероциклические соединения) [20–22]. Легко образуют соединения такого рода Fe, Ti, Cr, V, Cu, Ni, Co, Zn. Наиболее часто образуются хелаты, элемент в них в определенных границах «неуязвим» для разного рода реакций.

Самыми многочисленными группами элементов для исследуемых видов (табл. 2), впрочем, как обычно, оказались три: «слабое накопление и средний захват» (0, n), «слабый захват» (0.0 n), а также «очень слабый захват» (0.00 n и менее). В эти группы вошли все оставшиеся элементы (табл. 1), содержание которых в золе обычно ниже [2], чем в почве, они на протяжении жизни лишь захватываются растением и относятся к группе биологического захвата.

Ряды КБП по А.И. Перельману наглядно демонстрируют элементы, которые растение поглощает интенсивнее всего в условиях циклической миграции зольных элементов в системе почва – растение (биологический круговорот), а в каких его потребность минимальна. Ограниченное поглощение большей частью характерно для зеленых опадающих частей и репродуктивных органов растений, а для корней, коры и древесины стволов деревьев оно может быть и неограниченным. Распределение элементов в разных растениях имеет свои особенности. При этом необходимо учитывать морфолого-анатомические и биохимические особенности растения, существования растений-концентраторов и геохимических условий территории произрастания (включая характеристики почвенной среды). Наиболее часто распределение концентраций элементов приближается к логарифмически нормальному [2, 17].

Таблица 2. Характеристика исследуемых плодово-ягодных растений по группам захвата и интенсивности накопления элементов в зависимости от вида сырья

Вид	Элементы				
	Энергичное накопление $2n \times 10$	Сильное накопление n	Слабое накопление и средний захват $n \times 10^{-1}$	Слабый захват $n \times 10^{-2}$	Очень слабый захват $n \times 10^{-3}$
Листья + ягоды (плоды)					
Вишня обыкновенная	–	K	Mn, Al Ca, Ni, Cu, Sn, Pb	B, Zn, Sr, Zr, Ag, Cd, Sb, W	Si, P, V, Mn, Co, Ni, As, Mo
Малина обыкновенная	K	Ca, Ti, Mg	B, Al, Fe, Cu, Zn, Sr, Cd, Ag	Mn, Ni, As, Zr, Sn, Sb, W, Pb	Si, P, V, Co, Mn
Рябина обыкновенная	K	–	B, Mg, Al, Ca, Ti, Fe, Cu, Cd, W, Pb, Si	Zn, Sr, Zr, Sn, Sb	Si, P, V, Mn, Co, Ni, As, Mo
Ирга обыкновенная	–	K, Ca	Mg, Al, Ti, Cu, Sr, Sn, W, Pb	B, Fe, Zn, Zr, Ag, Cd, Sb	Si, P, V, Mn, Co, Ni, As, Mo
Смородина черная	K	Ca, Ti, Sr, Ag	B, Mg, Al, Fe, Cu, Cd, Sn, Sb, Bi	Mn, Zn, As, Zr, W	Si, P, V, Co, Ni, Mo
Ягоды (плоды)					
Вишня обыкновенная	–	K, Mg	Ca, Sr	B, Al, Ti, Fe, Cu, Zn, Zr, Cd, Sn, Sb	Si, P, V, Mn, Co, Ni, As, Mo, Ag, W, Pb
Малина обыкновенная	K	Ca,	Mg, Al, Ti, Cu, Sr, Zn, Cd, Ag	B, Al, Fe, As, Zr, Sn, Sb	Si, P, V, Mn, Co, Ni, Mo, W, Pb
Рябина обыкновенная	–	K	Mg, Ca, Cu, Sr, Pb	B, Al, Ti, Mn, Fe, Ag, Cd, Sb, W, Sn Zn,	Si, P, V, Co, Ni, As, Zr, Mo
Ирга обыкновенная	–	K	Mg, Ca, Ti	Al, Fe, Cu, Zn, Sr, Ag, Cd, Sn, Sb, W, Pb	B, Si, P, V, Mn, Co, Ni, As, Zr, Mo
Смородина черная	K	Ca	Mg, Ti, Cu, Ag	B, Al, Fe, Zn, Sr, Cd, Sb, Pb	Si, P, V, Mn, Co, Ni, As, Zr, Mo, Sn, W

Примечание: «–» означает отсутствие элементов.

Растения поглощают элементы непропорционально их содержанию в почве. Так, элементы с низкими ионными потенциалами (образуют хорошо растворимые катионы) или с высокими потенциалами (дают хорошо растворимые анионы) легко поступают в растительные объекты, но их накопление прямо не зависит от величины ионного потенциала [23]. Например, более подвижные элементы мигрируют в форме истинных растворов, менее подвижные (включая тяжелые металлы) – в виде коллоида или суспензии. Характер и форма миграции элементов зависит от многих факторов: свойств самого элементов, условий природной среды. Кроме того, элементы накапливаются в определенных компонентах растительной клетки, к примеру,

концентрация Cг в нуклеопротеидах семян в 100 раз, в белке пластоцианине Cu – в 800 раз выше, чем в самой растительной клетке.

Таблица 3. Биогеохимическая активность исследуемых плодово-ягодных растений

Вид	Биогеохимическая активность
Листья + ягоды (плоды)	
Вишня обыкновенная	11.2
Малина обыкновенная	84.2
Рябина обыкновенная	12.4
Ирга обыкновенная	9.6
Смородина черная	51.5
Ягоды (плоды)	
Вишня обыкновенная	11.4
Малина обыкновенная	37.4
Рябина обыкновенная	5.1
Ирга обыкновенная	4.6
Смородина черная	30.9

Далее оценивали биогеохимическую активность плодово-ягодных растений в целом по способности конкретного вида к накоплению микроэлементов. Полученные данные свидетельствуют о наивысшей биогеохимической активности (табл. 3) из изучаемых плодово-ягодных видов для малины обыкновенной, причем независимо от вида собранного сырья. Далее следует смородина черная. Им значительно, в 2.9–8.0 (по ягодам (плодам) до 4.3–8.5 (по листьям с плодами) раз, уступают по способности к накоплению микроэлементов вишня обыкновенная, еще

более – рябина обыкновенная и ирга обыкновенная (в порядке убывания). Такой тренд характерен как для сырья «листья+ягоды (плоды)», так и отдельно для ягод (плодов). Однако сырье «листья+ягоды (плоды)» во всех исследуемых случаях содержит намного больше микроэлементов в отличие от отдельных ягод (плодов). Этот показатель меняется от 1.7 до 2.6 раза. Практически равноценны по способности к накоплению микроэлементов лишь виды сырья вишни.

Выводы

1. С помощью метода ДАЭС с МАЭС в золе малины обыкновенной, рябины обыкновенной, смородины черной, вишни обыкновенной, ирги обыкновенной, культивируемых в окрестностях г. Зеленогорска Красноярского края, определено наличие 30 элементов, 25 из которых относят к микроэлементам, а 22 являются (условно) эссенциальными.

2. Установлена принадлежность минимальных экстремумов содержания в большинстве нечетным порядковым номерам элементов в таблице Д.И. Менделеева, а максимальных – четным, что представлено в виде комбинаций экстремумов с соответствующими порядковыми номерами атомов, наглядно характеризующих способность растения концентрировать определенные химические элементы.

3. По степени накопления из почвы, свидетельствующим об аккумуляции растением элементов, максимальным показателем для всех исследуемых видов и их сырья выступает К, для всех видов сырья малины и смородины – Са, для листьев с ягодами (плодами) вишни, малины и отдельно для плодов вишни – Mg, только для листьев с ягодами малины и смородины – Ti, для листьев с ягодами смородины – Sr и Ag. По градации «сильное накопление» выделяются Ti и Ag, что отлично для растительности.

4. Наивысшей биогеохимической активностью из изучаемых плодово-ягодных видов характеризуется малина (независимо от сырья), а далее следует смородина. Листья с ягодами (плодами) для всех растений содержит намного больше микроэлементов в отличие от их же ягод (плодов). Исследование показало возможность применения вышеуказанных образцов растений в качестве источников макро- и микроэлементов, включая эссенциальные.

Список литературы

1. Отмахов В.И., Рабцевич Е.С., Петрова Е.В., Шилова И.В., Шелег Е.С., Бабенков Д.Е. Элементный анализ лекарственных растений Сибири методом дуговой атомно-эмиссионной спектроскопии с многоканальным анализатором эмиссионных спектров // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. №1-2. С. 60–66. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-60-66.
2. Отмахов В.И., Саркисов Ю.С., Павлова А.Н., Кускова И.С., Обухова А.Е., Петрова Е.В., Омельченко М.В. Периодические зависимости распределения химических элементов в биологических объектах // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2019. №14. С. 6–25. DOI: 10.17223/24135542/14/1.
3. Сосорова С.Б., Меркушева М.Г., Убугунова Л.Л. Содержание микроэлементов в лекарственных растениях разных экосистем озера Котокельского (Западное Забайкалье) // Химия растительного сырья. 2016. №2. С. 53–59. DOI: 10.14258/jcprm.201602697.
4. Самойленко Г.Ю., Бондаревич Е.А., Коцюржинская Н.Н. Анализ эколого-геохимических индексов для растений вида *Potentilla tanacetifolia*, произрастающих в условиях Читы и Читинского района // Химия растительного сырья. 2021. №2. С. 281–290. DOI: 10.14258/jcprm.2021028097.
5. Шанина Е.В., Рубчевская Л.П. Минеральный состав биомассы *Rosa acicularis* Lindl. // Известия вузов. Пищевая технология. 2005. №2-3. С. 47–49.
6. Афанасьевна Л.В., Аюшина Т.А. Особенности аккумуляции микроэлементов в растениях *Rosa acicularis* // Химия растительного сырья. 2019. №3. С. 197–204. DOI: 10.14258/jcprm.2019035137.
7. ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы (ССОП) Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М., 2008. 8 с.
8. ГОСТ Р ИСО 11464-2011. Качество почвы. Предварительная подготовка проб для физико-химического анализа. М., 2012. 16 с.
9. Лабусов В.А. Приборы и комплексы компании «ВМК-Оптоэлектроника» для атомно-эмиссионного спектрального анализа. Современное состояние // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. №1-2. С. 12–21.
10. Лабусов В.А., Гаранин В.Г., Шелпакова И.Р. Многоканальные анализаторы атомно-эмиссионных спектров. Современное состояние и аналитические возможности // Журнал аналитической химии. 2012. Т. 6. №7. С. 697–707.
11. Гаранин В.Г., Неклюдов О.А., Петроченко Д.В., Семёнов З.В., Ващенко П.В. Программное обеспечение атомно-спектрального анализа // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. №1-2. С. 103–111. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-103-111.

12. Лисиенко М.Д., Климова Н.А. Опыт применения комплексов для атомно-эмиссионного спектрального анализа с анализатором МАЭС в аккредитованной лаборатории // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. №1-2. С. 33–37. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-33-37.
13. ГСО 8487-2003. Стандартные образцы состава графитового коллектора микропримесей. Комплект СОГ-37. УГТУ-УПИ. Екатеринбург, 2003. 36 с.
14. Кускова И.С. Применение методов дуговой и пламенной атомно-эмиссионной спектроскопии в медицине для анализа волос и создания лекарственных препаратов: дис. ... канд. хим. наук. Томск, 2017. 120 с.
15. Рабцевич Е.С. Аналитические подходы к определению элементного состава биологических объектов спектральными методами: дис. ... канд. хим. наук. Томск, 2021. 111 с.
16. Otmakhov V.I., Kuskova I.S., Obukhova Anastasiia, Petrova E.V., Sarkisov Y.S. Chemical codes identification based on periodic dependences of chemical element distribution in biological objects // JPCS. 2020. Vol. 1611. N1. Pp. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/1611/1/012038.
17. Отмахов В.И., Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Кускова И.С., Обухова А.В., Петрова Е.В. О некоторых закономерностях распределения химических элементов в живых организмах // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2020. №17. С. 34–50. DOI: 10.17223/24135542/17/3.
18. Отмахов В.И. Методологические особенности создания методик атомно-эмиссионного анализа различных объектов // Аналитика и контроль. 2005. Т. 9. №3. С. 245–249.
19. Садовникова Л.К., Орлов Д.С., Лозановская И.Н. Экология и охрана окружающей среды при химическом загрязнении. М., 2006. 334 с.
20. Krämera U., Talke I.N., Hanikenneb M. Transition metal transport // FEBS Letters. 2007. Vol. 581. N12. Pp. 2263–2272. DOI: 10.1016/j.febslet.2007.04.010.
21. Uraguchi S., Fujiwara T. Cadmium transport and tolerance in rice: perspectives for reducing grain cadmium accumulation // Rice. 2012. Vol. 5. N1. Pp. 1–8. DOI: 10.1186/1939-8433-5-5.
22. Verbruggen N., Hermans C., Schat H. Mechanisms to cope with arsenic or cadmium excess in plants // Current Opinion in Plant Biology. 2009. Vol. 12. N3. Pp. 364–372. DOI: 10.1016/j.pbi.2009.05.001.
23. Otmakhov V.I., Rabchevich E.S., Petrova E.V., Shilova I.V., Sheleg E.S., Babenkov D.E., Gindullina T.M. New method for detection and quantitative determination of macroelements and trace elements in plant raw material by arc atomic emission spectroscopy with a multichannel analyzer // Pharmaceutical Chemistry Journal. 2022. Vol. 56. N2. Pp. 277–282. DOI: 10.1007/s11094-022-02631-0.

Поступила в редакцию 14 января 2023 г.

После переработки 4 июня 2023 г.

Принята к публикации 4 сентября 2023 г.

Для цитирования: Обухова А.В., Отмахов В.И., Шилова И.В., Саркисов Ю.С., Янюк А.Е., Петрова Е.В. Особенности накопления элементов в плодово-ягодных растениях, культивируемых в окрестностях г. Зеленогорска Красноярского края // Химия растительного сырья. 2023. №4. С. 289–298. DOI: 10.14258/jcrpm.20230412482.

Obukhova A.V.^{1*}, Otmakhov V.I.¹, Shilova I.V.², Sarkisov Yu.S.³, Yanyuk A.Ye.¹, Petrova Ye.V.¹ FEATURES OF ELEMENTS ACCUMULATION IN FRUIT AND BERRY PLANTS CULTIVATED IN THE VICINITY OF ZELENOGORSK CITY, KRASNOYARSK REGION

¹ National Research Tomsk State University, av. Lenina, 36, Tomsk, 634050 (Russia), e-mail: nastyuffka201095@gmail.com

² Research Institute of Pharmacology and Regenerative Medicine E. D. Goldberg, TNRMC RAS, av. Lenina, 3, Tomsk, 634028 (Russia)

³ Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, pl. Solyanaya, 2/8, Tomsk, 634003 (Russia)

The aim of the study is to identify the peculiarities of the elemental composition of berries (fruits) and leaves of raspberry (*Rubus idaeus* L.), rowan (*Sorbus aucuparia* L.), black currant (*Ribes nigrum* L.), sour cherry (*Cerasus vulgaris* L.), serviceberry (*Amelanchier ovalis* Medik.) collected in the vicinity of Zelenogorsk, Krasnoyarsk Region, with an assessment of their potential use as sources of elements, ecological safety of use, as well as patterns of distribution of elements between plants, soil, and the surrounding environment. The elemental composition was analyzed using the method of arc atomic emission spectroscopy with a multi-channel analyzer of emission spectra (DAES with MAES) after ashing. As a result, the presence of 30 elements was determined in the ash of the studied plants, 25 of which belong to trace elements, and 22 are (conditionally) essential. The belongingness of the minimum extremes of content to mostly odd ordinal numbers of elements in the Mendeleev table was established, while the maximum extremes belonged to even ones. It is proposed to represent the revealed regularities in the form of combinations of extrema with the corresponding serial numbers of atoms, which clearly indicates the plant's ability to concentrate certain chemical elements. Based on the degree of accumulation from the soil, which indicates the ability of plants to accumulate elements, the highest indicator for all studied species and their raw materials is K, for all raspberry and blackcurrant raw materials – Ca, for cherry and raspberry leaves with berries (fruits) and separately for cherry fruits – Mg, only for blackcurrant leaves with berries (fruits) – Ti, for blackcurrant leaves with berries (fruits) – Sr and Ag. The study identified only Ti and Ag as having a "strong accumulation" in the biological absorption of elements, while the others were common for vegetation. Raspberry was found to have the highest biogeochemical activity among the studied fruit and berry plants (regardless of the raw material), followed by blackcurrant. It is shown that the raw materials "leaves + berries (fruits)" in all the studied cases contain much more trace elements, in contrast to individual berries (fruits). The study demonstrated the potential use of these plant species as sources of macroelements and trace elements, including essential ones.

Keywords: elemental composition, arc atomic emission spectroscopy, essential elements, raspberry, rowan, black currant, sour cherry, serviceberry, element distribution.

References

- Otmakhov V.I., Rabtsevich Ye.S., Petrova Ye.V., Shilova I.V., Sheleg Ye.S., Babenkov D.Ye. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2019, vol. 85, no. 1-2, pp. 60–66. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-60-66. (in Russ.).
- Otmakhov V.I., Sarkisov Yu.S., Pavlova A.N., Kuskova I.S., Obukhova A.Ye., Petrova Ye.V., Omel'chenko M.V. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya*, 2019, no. 14, pp. 6–25. DOI: 10.17223/24135542/14/1. (in Russ.).
- Sosorova S.B., Merkusheva M.G., Ubugunova L.L. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2016, no. 2, pp. 53–59. DOI: 10.14258/jcprm.201602697. (in Russ.).
- Samoylenko G.Yu., Bondarevich Ye.A., Kotsyurzhinskaya N.N. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2021, no. 2, pp. 281–290. DOI: 10.14258/jcprm.2021028097. (in Russ.).
- Shanina Ye.V., Rubchevskaya L.P. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya*, 2005, no. 2-3, pp. 47–49. (in Russ.).
- Afanas'yevna L.V., Ayushina T.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2019, no. 3, pp. 197–204. DOI: 10.14258/jcprm.2019035137. (in Russ.).
- GOST 17.4.4.02-84. *Okhrana prirody (SSOP) Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gel'mintologicheskogo analiza*. [GOST 17.4.4.02-84. Nature Conservation (SSOP) Soils. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis]. Moscow, 2008, 8 p. (in Russ.).
- GOST R ISO 11464-2011. *Kachestvo pochvy. Predvaritel'naya podgotovka prob dlya fiziko-khimicheskogo analiza*. [GOST R ISO 11464-2011. Soil quality. Preliminary preparation of samples for physical and chemical analysis]. Moscow, 2012, 16 p. (in Russ.).
- Labusov V.A. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2015, vol. 81, no. 1-2, pp. 12–21. (in Russ.).
- Labusov V.A., Garanin V.G., Shelpakova I.R. *Zhurnal analiticheskoy khimii*, 2012, vol. 6, no. 7, pp. 697–707. (in Russ.).
- Garanin V.G., Neklyudov O.A., Petrochenko D.V., Semonov Z.V., Vashchenko P.V. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2019, vol. 85, no. 1-2, pp. 103–111. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-103-111. (in Russ.).
- Lisiyenko M.D., Klimova N.A. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2019, vol. 85, no. 1-2, pp. 33–37. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-33-37. (in Russ.).
- GSO 8487-2003. *Standartnyye obratzysy sostava grafitovogo kollektora mikroprimsey. Komplekt SOG-37. UGTU-UPI*. [GSO 8487-2003. Standard samples of the composition of a graphite reservoir of microimpurities. Set SOG-37. USTU-UPI]. Ekaterinburg, 2003, 36 p. (in Russ.).

* Corresponding author.

14. Kuskova I.S. *Primeneniye metodov dugovoy i plamennoy atomno-emissionnoy spektroskopii v meditsine dlya analiza volos i sozdaniya lekarstvennykh preparatov: dis. ... kand. khim. nauk.* [Application of arc and flame atomic emission spectroscopy methods in medicine for hair analysis and creation of medicines: dis. ...cand. chem. Sci]. Tomsk, 2017, 120 p. (in Russ.).
15. Rabtsevich Ye.S. *Analiticheskiye podkhody k opredeleniyu elementnogo sostava biologicheskikh ob"yektov spektral'nymi metodami: dis. ... kand. khim. nauk.* [Analytical approaches to determining the elemental composition of biological objects by spectral methods: dis. ...cand. chem. Sci]. Tomsk, 2021, 111 p. (in Russ.).
16. Otmakhov V.I., Kuskova I.S., Obukhova Anastasiia, Petrova E.V., Sarkisov Y.S. *JPCS*, 2020, vol. 1611, no. 1, pp. 1–6, DOI: 10.1088/1742-6596/1611/1/012038.
17. Otmakhov V.I., Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P., Kuskova I.S., Obukhova A.V., Petrova Ye.V. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya*, 2020, no. 17, pp. 34–50. DOI: 10.17223/24135542/17/3. (in Russ.).
18. Otmakhov V.I. *Analitika i kontrol'*, 2005, vol. 9, no. 3, pp. 245–249. (in Russ.).
19. Sadovnikova L.K., Orlov D.S., Lozanovskaya I.N. *Ekologiya i okhrana okruzhayushchey sredy pri khimicheskom zagryaznenii.* [Ecology and environmental protection in case of chemical pollution]. Moscow, 2006, 334 p. (in Russ.).
20. Krämera U., Talkea I.N., Hanikenneb M. *FEBS Letters*, 2007, vol. 581, no. 12, pp. 2263–2272. DOI: 10.1016/j.febslet.2007.04.010.
21. Uraguchi S., Fujiwara T. *Rice*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 1–8. DOI: 10.1186/1939-8433-5-5.
22. Verbruggen N., Hermans C., Schat H. *Current Opinion in Plant Biology*, 2009, vol. 12, no. 3, pp. 364–372. DOI: 10.1016/j.pbi.2009.05.001.
23. Otmakhov V.I., Rabchevich E.S., Petrova E.V., Shilova I.V., Sheleg E.S., Babenkov D.E., Gindullina T.M. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 2022, vol. 56, no. 2, pp. 277–282. DOI: 10.1007/s11094-022-02631-0.

Received January 14, 2023

Revised June 4, 2023

Accepted September 4, 2023

For citing: Obukhova A.V., Otmakhov V.I., Shilova I.V., Sarkisov Yu.S., Yanyuk A.Ye., Petrova Ye.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2023, no. 4, pp. 289–298. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20230412482.