

УДК 581.192.2

ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ АДАПТОГЕННЫХ СОЕДИНЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ОРГАНАХ *EMPETRUM HERMAPHRODITUM HAGER.* В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

© Л.Н. Середа^{1*}, В.К. Жиров², Н.С. Цветов³, С.В. Дробобужская³

¹ Лаборатория медицинских и биологических технологий ФИЦ Кольский научный центр РАН, ул. Ферсмана, 14, Апатиты, 184209, Россия, sundukpandory87@mail.ru

² Центр медико-биологических проблем адаптации человека в Арктике НИЦ МБП КНЦ РАН, ул. Ферсмана, 41а, Апатиты, 184209, Россия

³ Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева ФИЦ Кольский научный центр РАН, ул. Ферсмана, 26а, Апатиты, 184209, Россия

Вороника обояполая – *Empetrum hermaphroditum* Hager. – доминантный кустарниковый гипоарктический вид аборигенной флоры арктической территории РФ, относящийся к семейству *Ericaceae* Juss. Имеет широкую экологическую амплитуду, обладает значительной фитомассой, обильно плодоносит и произрастает на всей территории Кольского полуострова. Все органы исследуемого растения являются источником разнообразных фенольных соединений, обуславливающих его значительный фармацевтический потенциал. Кроме экстремальных условий Крайнего Севера важным фактором стимуляции синтеза адаптогенных соединений растениями в Мурманской области является загрязнение окружающей среды отходами медно-никелевого производства в ее центральной промышленно-развитой части. В связи с этим целью работы являлась оценка сезонной динамики накопления и пространственной изменчивости содержания вторичных метаболитов в различных органах растений *Empetrum hermaphroditum* в условиях техногенного загрязнения. Для оценки общего содержания полифенолов, флавоноидов, общей антиоксидантной и антирадикальной активности использовался метод ультразвуковой экстракции водно-спиртовой смесью с содержанием 60 об.% этанола. Охарактеризовано временное и пространственное распределение адаптогенных соединений. Отмечено высокое содержание полифенольных компонентов в вегетативных органах растения. Установлено, что накопление загрязнителей растениями вороники изменяется в ряду: листья > зеленые плоды > спелые плоды. Выявлены индикаторные и аккумулятивные свойства листьев и зеленых плодов растений вороники в отношении Mn. Экстракти вегетативных органов растений вороники могут быть рекомендованы как перспективный источник полифенольных компонентов.

Ключевые слова: *Empetrum hermaphroditum*, биологически активные вещества, техногенное загрязнение, ультразвуковая экстракция, Арктика.

Для цитирования: Середа Л.Н., Жиров В.К., Цветов Н.С., Дробобужская С.В. Изменчивость содержания адаптогенных соединений в различных органах *Empetrum hermaphroditum* Hager. в условиях техногенного загрязнения на Кольском полуострове // Химия растительного сырья. 2024. №2. С. 293–301. DOI: 10.14258/jcprm.20240213032.

Введение

В последние годы наблюдается повышение интереса к растительным ресурсам Арктики, являющейся уникальной территорией, чьи метеорологические и гелиогеофизические условия способствуют максимальному накоплению растениями биологически активных веществ (БАВ). Также немаловажным фактором их усиленного синтеза является техногенная нагрузка, осуществляемая крупнейшим и длительно (более 80 лет) действующим на севере Европы [1] медно-никелевым комбинатом ОАО «Комбинат Североникель» (АО «Кольская ГМК»), выбросы которого содержат тяжелые металлы, окислы азота, фтора, сернистые и другие токсичные соединения [2].

* Автор, с которым следует вести переписку.

Одним из таких видов является доминант травяно-кустарничкового яруса аборигенной флоры арктической территории – вороника обоеполая – *Empetrum hermaphroditum* Hager. по [3] (syn.: *Empetrum nigrum subsp. hermaphroditum* (Hagerup) Böcher (World Flora Online, id: wfo-0000667247)), относящаяся к семейству вересковые (*Ericaceae* Juss.). По данным [4], этот кустарничковый гипоарктический вид, входящий в состав гипоарктического евроазиатского элемента, распространенный от тундровой зоны до подзоны средней тайги [5], обладает значительной фитомассой, произрастает и обильно плодоносит на всей территории Кольского полуострова.

Данные многолетних исследований разных авторов [6, 7] указывают на присутствие в листьях и плодах вороники фенольных соединений, включая антоцианы, флавонолы (кемпферол, кверцетин, мирицетин), фенольные кислоты и проантоксианидины, подавляющих развитие окислительного стресса и обладающих многими полезными (противоопухолевым, противомикробным, противовоспалительным, противовирусным и антимутагенным) для здоровья человека свойствами, которые обуславливают высокую лекарственную ценность этих растений.

В связи с перспективами использования вороники в промышленных целях на Кольском полуострове представляло интерес исследовать пространственную изменчивость и многолетнюю динамику содержания фенольных метаболитов, а также активность антирадикальной и антиокислительной систем различных органов в зависимости от величины техногенного загрязнения.

Экспериментальная часть

Объектами исследования служили вегетативные и генеративные органы вороники обоеполой. Сбор вегетативных органов производился во II декаду июля 2017-2021 г., а генеративных органов разной степени спелости (зеленые и спелые плоды) – III декаду июня и II декаду сентября 2021 г. (BBCN 12, 83 и 87, соответственно). Регистрация фенологических фаз производилась по методике [8], с последующим переводом в международную шкалу BBCN [9, 10]. Растительный материал был собран на семи стационарных площадках площадью 400 м² каждая, расположенных в Мончегорском районе Мурманской области, в зоне локального воздействия ОАО «Комбинат Североникель» (ОАО «Кольская ГМК») на 1231, 1236, 1241, 1246, 1251, 1256 и 1261 км автотрассы Санкт-Петербург – Мурманск соответственно (рис. 1).

Подготовка растительного материала включала в себя сушку на открытом воздухе и хранение в соответствии с [11].

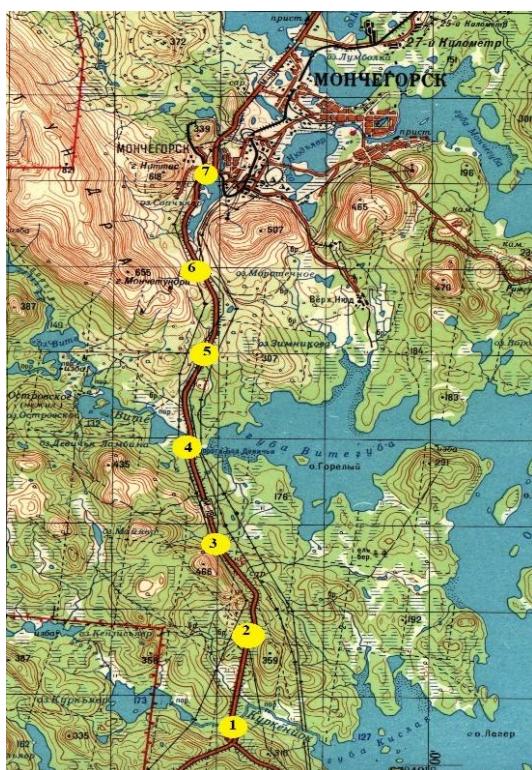


Рис. 1. Расположение стационарных площадок в зоне локального воздействия ОАО «Комбинат Североникель»

Экстрагирование проводилось методом ультразвуковой экстракции в предварительно термостатированной до 45 °С ультразвуковой ванне VBS-3DP (Вилитек, Россия) в течение 60 мин, с использованием гидромодуля 1 : 10 (w/v) и водно-спиртовой смесью с содержанием 60 об.% этанола в качестве экстрагента, с последующим центрифугированием экстрактов в течение 5 мин при 4000 об./мин в лабораторной центрифуге MiniSpin (Eppendorf, Германия).

Общее содержание полифенолов (total phenolic content (TPC)) определялось по реакции с реагентом Фолина-Чокалтеу, общее содержание флавоноидов (total flavonoid content (TFC)) – по реакции комплексообразования с хлоридом алюминия, общую антиоксидантную активность (total antioxidant activity (TAC)) – фосфомолибдатным методом с образованием молибденовых синей, в пересчете на галловую кислоту (GAE), рутин (RE) и аскорбиновую кислоту (AAE) соответственно, антирадикальную активность (free radical scavenging (FRS)) – по реакции со свободным радикалом 2,2-дифенил-1-пикрилгидразилом в %, с доработками [5]. Все химические анализы проводились в 3-кратной повторности с использованием экстрактов, разбавленных в 100 раз.

Оптическая плотность растворов измерялась на фотоколориметре КФК-3-01 (ЗОМЗ, Россия).

Грунт для анализа содержания тяжелых металлов отбирался в соответствии с [12].

Коэффициент подвижности (mobility ratio (MR)) определялся по отношению концентрации металла (мг/кг^{-1}) в исследуемых частях растения (C_{plant}) к его концентрации в почве (C_{soil}) в соответствии с уравнением

$$MR = \frac{C_{\text{plant}}}{C_{\text{soil}}},$$

где $MR > 1$ указывает на то, что растение обогащено металлами (аккумулятор); $MR = 1$ – довольно индифферентное поведение растения по отношению к металлам (индикатор) и $MR < 1$ – растение исключает металлы из поглощения [13, 14].

Анализ общего содержания тяжелых металлов в грунте производился методом автоклавного микроволнового вскрытия с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанный плазмой с динамической реакционной системой ELAN 9000 DRC-e (PerkinElmer, Канада) [15].

Полученные данные представлены в виде средних значений \pm стандартное отклонение и %. Статистическая значимость различий обсуждаемых результатов оценивалась с помощью теста Тьюки при уровне значимости ≤ 0.05 . Корреляционный анализ проводился по методу Пирсона. Расчеты производились в MS Excel 2021 (Microsoft, США).

Результаты и обсуждение

Многолетняя динамика содержания БАВ. Результаты анализа содержания фенольных соединений и их антиоксидантных активностей в экстрактах вегетативных органов растений вороники, собранных в 2017–2021 гг., представлены на рисунке 2.

Как видно, содержание фенольных соединений в экстрактах растений вороники достоверно не изменилось за весь исследуемый период. Значимые различия были обнаружены в отношении общей антиоксидантной активности между 2017/18, 2017/19 и 2017/20 гг. ($56 \pm 1.7 / 46.1 \pm 4.0$, $56 \pm 1.7 / 47 \pm 2.9$ и $56 \pm 1.7 / 47 \pm 1.8$ мг ААЕ/г соответственно, $p \leq 0.05$) и 2017/20 и 2017/21 гг. ($0.9 \pm 0.1 / 0.7 \pm 0.02$ и $0.9 \pm 0.1 / 0.7 \pm 0.02\%$ соответственно, $p \leq 0.05$) – для антирадикальной. Судя по результатам корреляционного анализа, основными ингибиторами свободнорадикального окисления являются полифенольные компоненты ($r=0.9$).

Проанализирована зависимость синтеза вторичных метаболитов от расстояния до источника загрязнения. Так, содержание общих полифенолов и флавоноидов и их антиоксидантной активности лежало в диапазонах 109 ± 5.2 – 128 ± 4.7 мг GAE/г, 32 ± 1.1 – 36 ± 1.3 мг RE/г и 47 ± 1.8 – 56 ± 1.7 мг ААЕ/г, $p \leq 0.05$ соответственно, при общем нелинейном характере распределения, с максимальными значениями на 7 и 2 площадках соответственно, а значения антирадикальной, изменявшиеся в диапазоне 0.7 ± 0.02 – $0.9 \pm 0.1\%$, $p \leq 0.05$, линейно снижались по мере приближении к источнику загрязнения.

В ходе проведения исследования установлено незначительное изменение усредненных по всем исследуемым площадкам концентраций элементов в вегетирующих органах растений вороники, со среднедневным накоплением – 113.5, 104.9, 104.5, 108.8, 114.3 мг/кг^{-1} , для каждого исследуемого года соответственно. Содержание металлов при этом снижалось в ряду: Mn > Ni > Cu > Zn > Co > Pb. Проведенный

корреляционный анализ не выявил устойчивой связи исследуемых метаболитов с концентрацией тяжелых металлов.

Пространственное распределение содержания БАВ. Проведен анализ распределения вторичных метаболитов в вегетативных (листьях) и генеративных (зеленых и спелых плодах), органах растений вороники, собранных в 2021 г. (рис. 3).

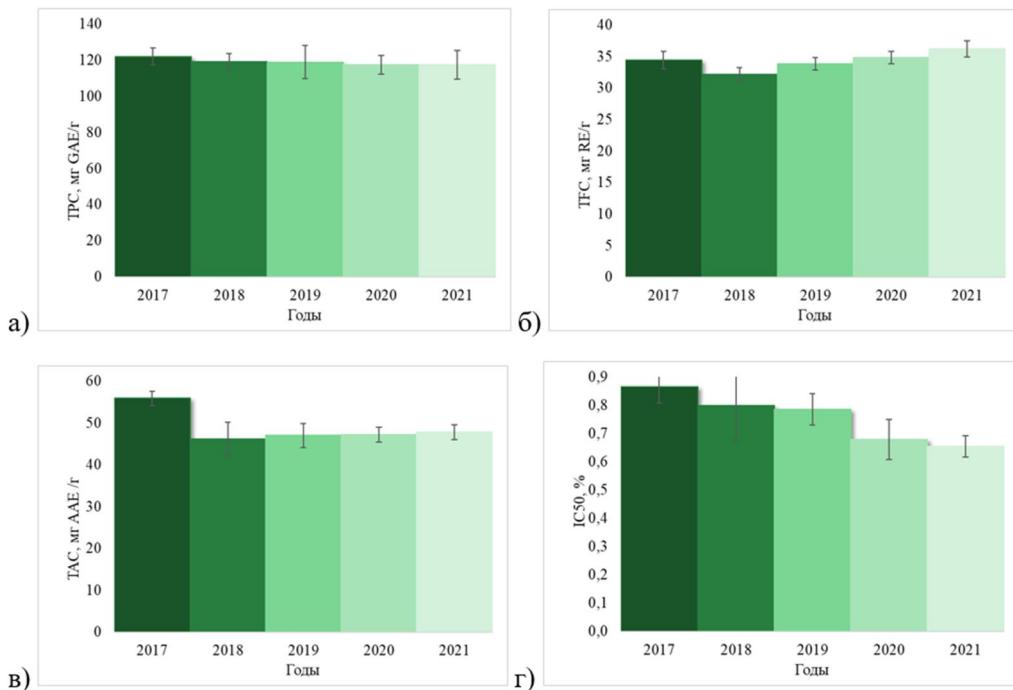


Рис. 2. Распределение содержания фенольных соединений (а), антиоксидантной (б) и антирадикальной (в) активностей в вегетативных органах растений вороники в условиях техногенного загрязнения ОАО «Комбинат Североникель» в 2017–2021 гг.

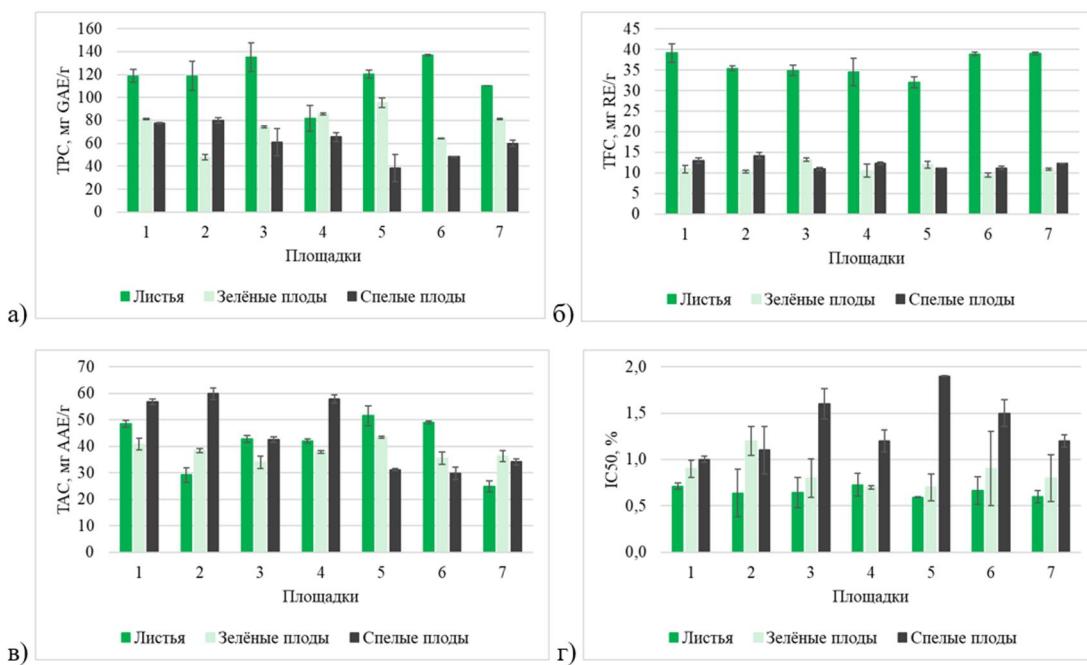


Рис. 3. Изменчивость содержания фенольных соединений (а, б) и их активностей (в, г) в вегетативных и генеративных органах растений вороники в условиях техногенного загрязнения ОАО «Комбинат Североникель» в 2021 г.

В целом, в вегетативных органах воронки обояеполой отмечено значительное содержание фенольных соединений относительно генеративных. Концентрация полифенольных компонентов выше в 1.5, флавоноидов – в 4 раза, чем в зеленых плодах, и в 3 и 3.5 раза, соответственно, чем в спелых, с преобладанием общих полифенолов относительно общих флавоноидов. По мере приближения к источнику загрязнения наибольшая антиоксидантная активность отмечена в экстрактах спелых плодов, с общим распределением относительно органов исследуемого растения: спелые плоды – листья – зеленые плоды, а наибольшей способностью ингибировать свободные радикалы, обладали экстракты листьев в ряду: листья > зеленые плоды > спелые плоды. Проведенный корреляционный анализ указывает на вклад полифенольных компонентов и флавоноидов ($r = 0.9$ и 0.7 соответственно) в общий антиоксидантный потенциал экстрактов спелых плодов.

Для определения механизма и степени накопления токсичных элементов различными органами растений воронки проанализировано содержание тяжелых металлов в грунте, определены коэффициенты их подвижности и схема распределения внутри растительного организма.

Исследуемая территория характеризуется нелинейной тенденцией накопления тяжелых металлов с максимальными концентрациями в грунте 1643, 620, 558 и 429 мг/кг⁻¹ для Ni, Cu, Zn и Mn соответственно. Распределение стационарных площадок в ряду увеличения концентраций осуществлялось следующим образом: $5 < 1 < 4 < 2 < 6 < 3 < 7$.

Отмечено нелинейное пространственное распределение содержания компонентов выбросов медно-никелевого производства в органах растений воронки (табл. 1), соответствующее схеме: листья > зеленые плоды > спелые плоды, с максимальными концентрациями преимущественно в локальной зоне. В фоновых условиях отмечено повышенное содержание Mn, со схемой распределения в органах растений: зеленые плоды > листья > спелые плоды и концентрациями 539.7, 91.4 и 51.6 мг/кг⁻¹ соответственно. Подобные закономерности также были отмечены [16] для ягод других представителей семейства вересковых – черники и брусники, содержание элементов в которых также превышало концентрации аналогичных в листьях.

Определение коэффициента подвижности элементов из грунта в органы растений воронки (табл. 2) выявило индикаторные и аккумулятивные свойства листьев и зеленых плодов в отношении Mn в фоновых условиях, а в локальной зоне техногенного воздействия отмечено активное перемещение из грунта Ni, Cu, Zn и Pb в листья и Zn в зеленые плоды.

Таблица 1. Содержание элементов (мг/кг⁻¹) в вегетативных и генеративных органах растений воронки, произрастающей в условиях техногенного загрязнения ОАО «Комбинат Североникель» в 2021 г.

Элемент	Номер стационарной площадки						
	1	2	3	4	5	6	7
Листья							
Mn	91.4	326.6	216.5	134.9	40.2	162.2	44.7
Co	0.046	1.74	1.04	1.84	3.75	8.89	12.7
Ni	<0.001	62.8	54.0	86.0	162.5	392.7	477.8
Cu	15.4	52.6	28.9	33.4	119.1	101.9	112.2
Zn	21.7	16.3	16.7	21.9	27.9	10.5	14.3
Pb	0.30	0.81	0.65	0.82	3.57	1.83	2.05
Зелёные плоды							
Mn	539.7	75.0	170.3	52.9	44.0	30.4	32.7
Co	0.38	<0.001	0.22	0.18	1.03	1.07	7.30
Ni	20.7	<0.001	0.72	4.64	38.6	36.9	227.1
Cu	12.5	16.2	17.7	10.2	20.5	19.0	137.2
Zn	14.2	23.3	28.3	15.1	13.6	17.1	22.9
Pb	0.26	1.09	2.62	1.08	1.04	0.54	3.11
Спелые плоды							
Mn	51.6	33.4	33.9	23.9	9.28	2.91	8.97
Co	0.62	<0.001	0.12	0.015	0.21	0.29	0.99
Ni	17.3	<0.001	<0.001	<0.001	9.70	9.13	40.9
Cu	10.8	8.86	8.94	9.95	9.85	6.20	13.4
Zn	21.9	10.2	18.9	9.39	6.47	6.30	10.7
Pb	0.89	1.12	1.76	0.46	1.10	0.84	1.23

Таблица 2. Коэффициент подвижности тяжелых металлов из грунта в листья и зеленые плоды растений вороники, произрастающей в условиях техногенного загрязнения ОАО «Комбинат Североникель» в 2021 г.

Элемент	Листья		Зелёные плоды	
	Номер площадки			
	2	5	1	5
Mn	1	<1	1	<1
Ni	<1	>1	>1	<1
Cu	<1	>1	<1	<1
Zn	<1	>1	<1	>1
Pb	<1	>1	<1	<1

Проведенный корреляционный анализ показал незначительную ($r=0.5$) взаимосвязь в отношении полифенольных компонентов в экстрактах спелых плодов для Zn, общего содержания флавоноидов в экстрактах спелых плодов для Mn и листьев для Co и Ni, а также общей антиоксидантной активности в экстрактах листьев для Mn, что свидетельствует о наличии факторов, влияющих на интенсивность синтеза фенольных соединений, помимо реакции на стресс от техногенного загрязнения. Достаточно высокий ($r=0.8$) коэффициент корреляции наблюдается в отношении полифенольных компонентов и антиоксидантной активности в экстрактах спелых плодов для Mn.

В настоящее время известно о существовании растений – манганофиллов, способных аккумулировать марганец в значительных концентрациях, что неоднократно подтверждалось рядом исследований [16–18], указывающих на способность растений семейства вересковых выступать аккумуляторами Mn. Марганец, являясь важнейшим микроэлементом, входящим в состав всех тканей растения [19], выступает регулятором таких окислительно-восстановительных процессов, как фотосинтез и дыхание, и индуктором образования хлорофилла, сахаров, белков [20, 21].

Таким образом, результаты анализа полученных данных позволяют рассматривать вегетативные органы растений вороники в качестве потенциального источника полифенольных адаптогенов. Исследования многолетней динамики накопления целевых компонентов не выявили временной зависимости содержания адаптогенных соединений и ее связи с концентрацией тяжелых металлов в окружающей среде. Отмечена активная регуляция поступления элементов в листья и плоды непосредственно исследуемым растением, что является типичным обменным процессом, даже для видов, произрастающих на территориях с критическими концентрациями токсических элементов в грунте [16], что совместно со способностью марганца повышать устойчивость растений к стрессовым факторам окружающей среды и регулировать поступление элементов из грунта [20, 21] позволяет минимизировать аккумуляцию токсичных элементов. Значительная взаимосвязь в отношении полифенольных компонентов и антиоксидантной активности наблюдается лишь в экстрактах спелых плодов в отношении Mn, что при отсутствии миграции элемента из грунта, вероятно, указывает на влияние аэротехногенного загрязнения.

Полученные данные могут стать основой для проведения более детальных исследований влияния техногенного воздействия на синтез адаптогенных соединений в вегетативных и генеративных органах растений вороники, произрастающей на территории Кольской Арктики.

Выходы

1. Многолетние (2017–2021 гг.) исследования накопления адаптогенных соединений в экстрактах растений вороники не выявили многолетней динамики его изменений. Отмечены повышенная антиоксидантная активность в 2017 г. по сравнению с другими годами проведения исследований, и устойчивое снижение антирадикальной активности с 2017 по 2021 гг.
2. Установлен нелинейный характер накопления основных загрязняющих компонентов медно-никелевого производства, относительно фоновой территории, соответствующий схеме: листья > зеленые плоды > спелые плоды.
3. Выявлены индикаторные и аккумулятивные свойства листьев и зеленых плодов исследуемого растения в отношении Mn.
4. Экстракти вегетативных органов растений вороники могут быть рекомендованы, как перспективный источник полифенольных компонентов.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках темы НИР № FMEZ-2023-0012.

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. Кашулина Г.М. Экстремальное загрязнение почв выбросами медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове // Почвоведение. 2017. №7. С. 860–873. DOI: 10.7868/S0032180X17070036.
2. Крючков В.В., Макарова Т.Д. Аэротехногенное воздействие на экосистемы Кольского Севера. Апатиты, 1989. 96 с.
3. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб., 1995. 990 с.
4. Раменская М.Л. Анализ флоры Мурманской области и Карелии. Л., 1983. 216 с.
5. Tsvetov N., Sereda L., Korovkina A., Artemkina N., Kozerozhets I., Samarov A. Ultrasound-assisted extraction of phytochemicals from *Empetrum hermaphroditum* Hager. using acid-based deep eutectic solvent: kinetics and optimization // Biomass Conversion and Biorefinery. 2022. Vol. 12. Pp. 145–156. DOI: 10.1007/s13399-022-02299-2.
6. Lorion J., Small E. Crowberry (Empetrum): A Chief Arctic Traditional Indigenous Fruit in Need of Economic and Ecological Management // The Botanical Review. 2021. Vol. 87(3). Pp. 259–310. DOI: 10.1007/s12229-021-09248-0.
7. Bezverkhniaia E.A., Ermilova E.V., Kadyrova T.V., Krasnov E.A., Brazovskii K.S., Ponkratova A.O., Luzhanin V.G., Belousov M.V. Bezverkhniaia E. Phytochemistry, ethnopharmacology and pharmacology of the genus *Empetrum*: A review // Advances in Traditional Medicine. 2023. Vol. 23(3). Pp. 659–672. DOI: 10.1007/s13596-021-00612-4.
8. Бейдеман И.Н. Методика фенологических наблюдений при геоботанических исследованиях. М.; Л., 1954. 130 с.
9. Meier U., Bleiholder H., Buhr L., Feller C., Hacks H., Hess M., Lancashire P.D., Schnock U., Stauss R., Boom van den T., Weber E., Zwergert P. The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants – history and publications // Journal für Kulturpflanzen. 2009. Vol. 61. Pp. 41–52. DOI: 10.5073/JfK.2009.02.01.
10. Meier U. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants BBCH. Quedlinburg, 2018. 204 p. DOI: 10.5073/20180906-074619.
11. ОФС.1.1.0011.15 Хранение лекарственного растительного сырья и лекарственных растительных препаратов // Государственная фармакопея РФ, XIV изд. М., 2018.
12. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М., 2017. 10 с.
13. Mingorance M.D., Valdés B., Oliva S.R. Strategies of heavy metal uptake by plants growing under industrial emissions // Environment International. 2007. Vol. 33(4). Pp. 514–520. DOI: 10.1016/j.envint.2007.01.005.
14. Serbula S.M., Miljkovic D.D., Kovacevic R.M., Ilic A.A. Assessment of airborne heavy metal pollution using plant parts and topsoil // Ecotoxicology and Environmental safety. 2012. Vol. 76. Pp. 209–214. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2011.10.009.
15. Slukovskaya M.V., Kremenetskaya I.P., Mosendz I.A., Ivanova T.K., Drogobuzhskaya S.V., Ivanova L.A., Novikov A.I., Shirokaya A.A. Thermally activated serpentine materials as soil additives for copper and nickel immobilization in highly polluted peat // Environmental Geochemistry and Health. 2023. Vol. 45(1). Pp. 67–83. DOI: 10.1007/s10653-022-01263-3.
16. Кашулина Г.М., Салтан Н.В. Химический состав растений в экстремальных условиях локальной зоны комбината «Североникель». Апатиты, 2008. 239 с.
17. Kandziora-Ciupa M., Nadgórnska-Socha A., Barczyk G., Ciepa R. Bioaccumulation of heavy metals and ecophysiological responses to heavy metal stress in selected populations of *Vaccinium myrtillus* L. and *Vaccinium vitis-idaea* L. // Ecotoxicology. 2017. Vol. 26. Pp. 966–980. DOI: 10.1007/s10646-017-1825-0.
18. Kandziora-Ciupa M., Dabioch M., Nadgórnska-Socha A. Evaluating the accumulation of antioxidant and macro- and trace elements in *Vaccinium myrtillus* L. // Biological Trace Element Research. 2022. Vol. 200(9). Pp. 4175–4185. DOI: 10.1007/s12011-021-02989-4.
19. Liu J., Shang W., Zhang X., Zhu Y., Yu K. Mn accumulation and tolerance in *Celosia argentea* Linn.: A new Mn-hyperaccumulating plant species // Journal of Hazardous Materials. 2014. Vol. 267. Pp. 136–141. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.12.051.
20. Копылова Л.В. Аккумуляция железа и марганца в листьях древесных растений в техногенных районах Забайкальского края // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12, №1-3. С. 709–712.

21. Побилат А.Е., Волошин Е.И. Марганец в почвах и растениях южной части Средней Сибири // Микроэлементы в медицине. 2017. Т. 18, №2. С. 43–47. DOI: 10.19112/2413-6174-2017-18-2-43-47.

Поступила в редакцию 8 июня 2023 г.

После переработки 23 октября 2023 г.

Принята к публикации 13 ноября 2023 г.

Sereda L.N.^{1}, Zhirov V.K.², Tsvetov N.S.³, Drogobuzhskaya S.V.³ VARIABILITY OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES CONTENT IN *EMPETRUM HERMAPHRODITUM* HAGER. LEAVES AND FRUITS UNDER INDUSTRIAL POLLUTION IN THE KOLA PENINSULA*

¹ *Laboratory of Medical and Biological Technologies Federal Research Center Kola Scientific Center RAS, Fersman st., 14, Apatity, 184209, Russia, sundukpandory87@mail.ru*

² *Center for Medical and Biological Problems of Human Adaptation in the Arctic, Scientific Research Center for International Biology, KSC RAS, Fersman st., 41a, Apatity, 184209, Russia*

³ *Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials named after. I.V. Tananaeva Federal Research Center Kola Scientific Center RAS, Fersman st., 26a, Apatity, 184209, Russia*

The crowberry *Empetrum hermaphroditum* Hager. is dominant shrubby hypoarctic species of native flora of the Arctic territory of the Russian Federation, belonging to the Ericaceae family. It is distributed in a wide ecological amplitude, has a significant phytomass, bears fruit profusely and grows throughout the Kola Peninsula. All parts of the studied plant are a source of a various phenolic compounds, which determines its significant pharmaceutical potential. An important factor, in addition to the extreme conditions of the Kola Peninsula, which enhances the synthesis of adaptogenic compounds, is pollution by wastes of copper-nickel production. In connection with the above, the aim of the work was to assess the temporal and spatial distribution of content of the secondary metabolites, synthesized by various organs of *Empetrum hermaphroditum* under industrial pollution. To assess the total content of polyphenols, flavonoids, total antioxidant and antiradical activity, the method of ultrasonic extraction with 60% ethanol was used. The temporal and spatial distribution of adaptogenic compounds is characterized, and a high content of polyphenolic components in the vegetative organs of the plant is noted. It has been established that the accumulation of pollutants by crowberry plants changes in the following order: leaves > green fruits > ripe fruits. The indicator and accumulative properties of leaves and green fruits of crow plants in relation to Mn were revealed. Extracts of vegetative organs of crow plants can be recommended as a promising source of polyphenolic components.

Keywords: *Empetrum hermaphroditum* Hager., biologically active substances, technogenic pollution, ultrasound-assisted extraction, Arctic.

For citing: Sereda L.N., Zhirov V.K., Tsvetov N.S., Drogobuzhskaya S.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2024, no. 2, pp. 293–301. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20240213032.

References

1. Kashulina G.M. *Pochvovedeniye*, 2017, no. 7, pp. 860–873. DOI: 10.7868/S0032180X17070036. (in Russ.).
2. Kryuchkov V.V., Makarova T.D. *Aerotekhnogennoye vozdeystviye na ekosistemy Kol'skogo Severa*. [Aerotechnogenic impact on the ecosystems of the Kola North]. Apatity, 1989, 96 p. (in Russ.).
3. Cherepanov S.K. *Sosudistyye rasteniya Rossii i sopredel'nykh gosudarstv (v predelakh byvshego SSSR)*. [Vascular plants of Russia and neighboring states (within the former USSR)]. St. Petersburg, 1995, 990 p. (in Russ.).
4. Ramenskaya M.L. *Analiz flory Murmanskoy oblasti i Karelii*. [Analysis of the flora of the Murmansk region and Karelia]. Leningrad, 1983, 216 p. (in Russ.).
5. Tsvetov N., Sereda L., Korovkina A., Artemkina N., Kozerzhets I., Samarov A. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022, vol. 12, pp. 145–156. DOI: 10.1007/s13399-022-02299-2.
6. Lorion J., Small E. *The Botanical Review*, 2021, vol. 87(3), pp. 259–310. DOI: 10.1007/s12229-021-09248-0.
7. Bezverkhniaia E.A., Ermilova E.V., Kadyrova T.V., Krasnov E.A., Brazovskii K.S., Ponkratova A.O., Luzhanin V.G., Belousov M.V. *Bezverkhniaia E. Advances in Traditional Medicine*, 2023, vol. 23(3), pp. 659–672. DOI: 10.1007/s13596-021-00612-4.
8. Beydeman I.N. *Metodika fenologicheskikh nablyudeniy pri geobotanicheskikh issledovaniyakh*. [Methodology for phenological observations in geobotanical research]. Moscow; Leningrad, 1954, 130 p. (in Russ.).
9. Meier U., Bleiholder H., Buhr L., Feller C., Hacks H., Hess M., Lancashire P.D., Schnock U., Stauss R., Boom van den T., Weber E., Zwerger P. *Journal für Kulturpflanzen*, 2009, vol. 61, pp. 41–52. DOI: 10.5073/JfK.2009.02.01.
10. Meier U. *Growth stages of mono- and dicotyledonous plants BBCH*. Quedlinburg, 2018, 204 p. DOI: 10.5073/20180906-074619.

* Corresponding author.

11. *Gosudarstvennaya farmakopeya RF, XIV izd.* [State Pharmacopoeia of the Russian Federation, XIV ed.]. Moscow, 2018. (in Russ.).
12. *GOST 17.4.4.02-2017. Mezhdunarodnyy standart. Okhrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gel'mintologicheskogo analiza.* [GOST 17.4.4.02-2017. Interstate standard. Protection of Nature. Soils. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis]. Moscow, 2017, 10 p. (in Russ.).
13. Mingorance M.D., Valdés B., Oliva S.R. *Environment International*, 2007, vol. 33(4), pp. 514–520. DOI: 10.1016/j.envint.2007.01.005.
14. Serbula S.M., Miljkovic D.D., Kovacevic R.M., Ilic A.A. *Ecotoxicology and Environmental safety*, 2012, vol. 76, pp. 209–214. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2011.10.009.
15. Slukovskaya M.V., Kremenetskaya I.P., Mosendz I.A., Ivanova T.K., Drogobuzhskaya S.V., Ivanova L.A., Novikov A.I., Shirokaya A.A. *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, vol. 45(1), pp. 67–83. DOI: 10.1007/s10653-022-01263-3.
16. Kashulina G.M., Saltan N.V. *Khimicheskiy sostav rasteniy v ekstremal'nykh usloviyakh lokal'noy zony kombinata «Severonikel'».* [Chemical composition of plants in extreme conditions of the local zone of the Severonickel plant]. Apatity, 2008, 239 p. (in Russ.).
17. Kandziora-Ciupa M., Nadgórnska-Socha A., Barczyk G., Ciepa R. *Ecotoxicology*, 2017, vol. 26, pp. 966–980. DOI: 10.1007/s10646-017-1825-0.
18. Kandziora-Ciupa M., Dabioch M., Nadgórnska-Socha A. *Biological Trace Element Research*, 2022, vol. 200(9), pp. 4175–4185. DOI: 10.1007/s12011-021-02989-4.
19. Liu J., Shang W., Zhang X., Zhu Y., Yu K. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, vol. 267, pp. 136–141. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.12.051.
20. Kopylova L.V. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2010, vol. 12, no. 1-3, pp. 709–712. (in Russ.).
21. Pobilat A.Ye., Voloshin Ye.I. *Mikroelementy v meditsine*, 2017, vol. 18, no. 2, pp. 43–47. DOI: 10.19112/2413-6174-2017-18-2-43-47. (in Russ.).

Received June 8, 2023

Revised October 23, 2023

Accepted November 13, 2023

Сведения об авторах

Середа Лидия Николаевна – младший научный сотрудник лаборатории медицинских и биологических технологий, sundukpandory87@mail.ru

Жиров Владимир Константинович – доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, профессор, и.о. директора, v_zhirov_1952@mail.ru

Цветов Никита Сергеевич – кандидат химических наук, научный сотрудник, tsvet.nik@mail.ru

Дрогобужская Светлана Витальевна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, доцент, s.drogobuzhskaia@ksc.ru

Information about authors

Sereda Lidiya Nikolaevna – junior researcher at the Laboratory of Medical and Biological Technologies, sundukpandory87@mail.ru

Zhirov Vladimir Konstantinovich – Doctor of Biological Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Acting Director, v_zhirov_1952@mail.ru

Tsvetov Nikita Sergeevich – Candidate of Chemical Sciences, researcher, tsvet.nik@mail.ru

Drogobuzhskaya Svetlana Vitalievna – Candidate of Chemical Sciences, senior researcher, associate professor, s.drogobuzhskaia@ksc.ru