

УДК: 641.522.8; 504.75

**ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ АДАПТОГЕННЫХ СОЕДИНЕНИЙ
В ВЕГЕТАТИВНЫХ ОРГАНАХ *BETULA PUBESCENS* EHRR.
В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ
АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РФ**

**Лидия Николаевна Середа¹, Владимир Константинович Жиров²,
Светлана Витальевна Дрогобужская³**

¹ Центр наноматериаловедения ФИЦ «Кольский Научный Центр» РАН,
184209, г. Апатиты ул. Ферсмана, д.14

² Центр медико-биологических проблем адаптации человека в Арктике
ФИЦ «Кольский Научный Центр» РАН,
184209, г. Апатиты ул. Ферсмана, д.14

³ Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья
им. И.В. Тананаева ФИЦ «Кольский Научный Центр» РАН,
184209, г. Апатиты ул. Ферсмана, д.26а
E-mail: sundukpandory87@mail.ru

Изучение особенностей синтеза вторичных метаболитов растений в условиях промышленного воздействия, имеет колоссальное значение для понимания механизмов формирования толерантности растений к техногенному стрессу и диагностике состояния окружающей среды. Анализ динамики накопления адаптогенных метаболитов позволяет обнаружить влияние загрязнения на растения до проявления первых признаков их повреждения. Важным фактором усиленного синтеза вторичных метаболитов растениями, произрастающими на территории Кольского полуострова, является техногенная нагрузка медно-никелевого комбината ОАО «Комбинат Североникель», выбросы которого содержат тяжелые металлы. Берёза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.), листья которой содержат значительное количество фенольных соединений, часто выбирается в качестве модельного вида для анализа влияния техногенного загрязнения. Целью настоящей работы являлось изучение изменчивости содержания адаптогенных соединений в вегетативных органах *B. pubescens*, произрастающей в условиях техногенного загрязнения. В результате проведения работы, проанализирована зависимость синтеза флавоноидов и антиоксидантов от расстояния до источника техногенного загрязнения. Отмечен общий нелинейный характер пространственного распределения в отношении суммы флавоноидов, и линейный – для соединений, проявляющих антиоксидантную активность. Установлена нелинейная тенденция накопления тяжелых металлов.

Ключевые слова: *Betula pubescens* Ehrh.; биологически активные вещества; техногенное загрязнение; ультразвуковая экстракция; Арктика

Введение

В современных непрерывно ухудшающихся экологических условиях, изучение особенностей синтеза вторичных метаболитов у дикорастущих растений, вынужденных адаптироваться к условиям техногенного прессинга, имеет колоссальное значение для изучения механизмов формирования толерантности растений к техногенному стрессу и диагностики состояния окружающей среды [1]. Известно, что флавоноиды играют важную роль в защите растений от стрессов, вызванных биогенными и абиогенными факторами, и имеют функциональное значение на уровне всего организма благодаря индукции транскрипции генов таких ферментов фенилпропаноидного обмена, как фенилаланин-аммиак-лиаза, халконсинтаза, халкон-изомераза, циннамат-4-гидроксилаза, флавоноид-30-гидроксилаза и т.д. [2]. Поскольку динамика накопления адаптогенных метаболитов позволяет обнаружить первые стадии загрязнения окружающей среды до появления визуальных признаков повреждения растительного

организма, изменение уровня фенольных соединений рекомендуется для её биомониторинга [3].

Важным фактором усиленного синтеза вторичных метаболитов растениями в условиях Кольского полуострова, характеризующегося экстремальными климатическими условиями, является техногенная нагрузка, осуществляемая медно-никелевым комбинатом ОАО «Комбинат Североникель» (АО «Кольская ГМК»), выбросы которого содержат высокие концентрации тяжелых металлов [4, 5], нанося значительный ущерб медленно восстанавливающейся бореальной экосистеме.

Берёза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.) – представитель семейства берёзовые (*Betulaceae* Gray) древесное растение, листья которого охарактеризованы высоким содержанием фенольных соединений, особенно гиперозида, хлорогеновой кислотой, кверцетина, рутина, процианидинов, часто выбирается в качестве модельного вида для изучения влияния техногенного загрязнения [6].

Таким образом, целью настоящей работы, является изучение изменчивости содержания адаптогенных соединений в вегетативных органах лесообразующих пород на примере *B. pubescens*, произрастающей в условиях техногенного загрязнения на территории Арктической зоны РФ.

Материалы и методы

Объектами исследования служили вегетативные органы берёзы пушистой. Сбор растительного материала производился во II декаду июля 2021 г. в фазу полного формирования листьев (VBCH 12). Регистрация фенологических фаз производилась по методике [7], с последующим переводом в международную шкалу VBCH [8, 9].

Растительный материал был собран на семи (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7) стационарных площадках площадью 400 м² каждая, расположенных в Мончегорском районе Мурманской области, в зоне воздействия ОАО «Комбинат Североникель» (ОАО «Кольская ГМК») на 1231, 1236, 1241, 1246, 1251, 1256 и 1261 км автотрассы М-18 Санкт-Петербург – Мурманск, соответственно (рис. 1).

Подготовка растительного материала включала в себя сушку на открытом воздухе и хранение в соответствии с [10], измельчение и ситование. Для получения экстрактов, использовалось растительное сырьё, измельченное до размера частиц, проходящих сквозь сито с отверстиями диаметром 1 мм.

Экстрагирование проводилось методом ультразвуковой экстракции в предварительно термостатированной до 45°C ультразвуковой ванне VBS-3DP (Вилитек, Россия) в течение 60 мин, с использованием гидромодуля 1: 10 (m/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 флавоноидов (total flavonoid content (TFC)) определялось по реакции комплексообразования с хлоридом алюминия, для этого к 1 мл 2% раствора хлорида алюминия добавляли 1 мл разбавленного в 20 раз экстракта, общая антиоксидантная активность (total antioxidant capacity (TAC) – фосфомолибдатным методом с образованием молибденовых синей, для чего к 2 мл реакционного раствора (4 mM молибдата аммония + 28 mM дигидрофосфата калия + 0.6 М серная кислота) добавляли 0.005 мл нативного экстракта, в соответствии с [5]. Полученные смеси термостатировали при 25°C в течение 60 минут и при 95°C в течение 90 минут, соответственно. Содержание исследуемых компонентов выражали в мг эквивалента рутина (rutin equivalent (RE) и аскорбиновой кислоты (ascorbic acid equivalent (AAE) на 1 г абсолютно сухого растительного материала.

Оптическая плотность растворов измерялась на фотоколориметре КФК-3-01 (ЗОМЗ, Россия) при длине волны 420 и 805 нм, соответственно.



Рис. 1 Расположение стационарных площадок (1 – 1231, 2 – 1236, 3 – 1241, 4 – 1246, 5 – 1251, 6 – 1256, 7 – 1261 км) в зоне воздействия ОАО «Комбинат Североникель» (СН)

Грунт для анализа содержания тяжелых металлов отбирался в соответствии с [11]. Точечные пробы, содержащие типичные для генетических горизонтов почвы, отбирались почвенным буром на каждой стационарной площадке методом конверта, затем составлялась объединенная проба путем смешивания точечных проб массой не менее 1 кг. Перед отправкой на анализ пробы подвергались соответствующей пробоподготовке.

Элементный состав грунта определялся методом автоклавного микроволнового вскрытия в соответствии с [12]. Для чего образцы массой 1000 мг подвергались автоклавному разложению с использованием азотной, соляной кислот и фтороводорода, варьируя состав в 2-х циклах по 90 мин каждый. Для разложения использовались микроволновая система MW 4 (Berghof, Германия) и автоклавы на 100 мл DAK-100 из материала PTFM с максимальной температурой до 200°C и давлением до 100 бар. Кислоты квалификации «о.с.ч.» предварительно подвергались изотермической перегонке на установке Berghof (Berghof, Германия)

После разложения анализируемые растворы переводились в полипропиленовые пробирки вместимостью 100 мл и доводились до метки 2% азотной кислотой. Для разбавления растворов также использовалась 2% азотная кислота. Для приготовления растворов использовали деионизированную воду с удельным сопротивлением 18,2 МΩ см, полученную с помощью системы очистки воды «Millipore Element» (Millipore, США).

Измерения проводили на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой ELAN 9000 DRC-e (Perkin Elmer, США). Для настройки прибора использовали стандартный образец Multi-element ICP-MS Calibration Standard STD 1 (Perkin Elmer,

США), для градуировки прибора применяли стандартные растворы ICP-MS Calibration Standard IV-STOCK-21, IV-STOCK-28 (Inorganic Ventures, США) с массовой концентрацией определяемых элементов 10 мг/дм³ и погрешностью, не превышающей 0.5% при $p = 0.95$ (табл. 1).

Для проверки правильности измерений использовали стандартные образцы: CRM-SOIL-A (High-purity standards, USA), ГСО СП-2 (ГСО № 902-76, Россия), СП-3 (ГСО № 903-76, Россия), БИЛ-1 (ГСО № 7126-84, Россия).

Таблица 1

Элементный состав градуировочных растворов

Стандартный раствор	Элементы
Standard № 21	Al, Ag, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, In, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Rb, Se, Sr, Tl, U, V, Zn
Standard № 28	Au, Hf, Ir, Pd, Pt, Rh, Ru, Sb, Sn, Te

Химические анализы проводились в 3-кратной повторности. Полученные данные представлены в виде средних значений $\pm$ стандартное отклонение. 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

Результаты определения общего содержания флавоноидов в экстрактах вегетативных органов растений берёзы, представлены на рисунке 2. Проанализирована зависимость синтеза флавоноидов от расстояния до источника техногенного загрязнения. Установлено, что содержание анализируемого соединения лежало в диапазоне $33,7 \pm 0,3$ – $43,8 \pm 0,3$ мг РЕ/г, при общем нелинейном характере распределения, с минимальным значением – на 3 площадке, и максимальными на – 4 и 5, соответственно. Как видно из представленных данных, значимое ($p \leq 0.05$) возрастание содержания флавоноидных компонентов в исследуемых экстрактах по мере приближения к источнику загрязнения наблюдалось в ряду 1 < 4.

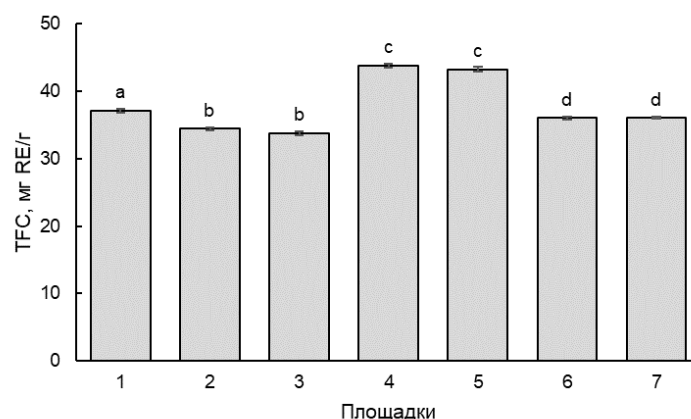


Рис. 2 Изменчивость содержания флавоноидов экстрактах вегетативных органах растений берёзы в условиях техногенного загрязнения ОАО «Комбинат Североникель» в 2021 г.

На рисунке 3 представлены результаты определения общей антиоксидантной активности экстрактов вегетативных органов растений берёзы. Проведён анализ зависимости проявляемой полученными экстрактами антиоксидантной активности от расстояния до источника загрязнения. Определено, что содержание антиоксидантов лежало в диапазоне $76,5 \pm 0,2$ – $92,04 \pm 1,4$ мг ААЕ/г при линейном характере распределения, с минимальным значением – на 1 площадке, и максимальным – на 7, соответственно. Видно, что значимое ($p \leq 0.05$) возрастание содержания веществ, проявляющих антиоксидантную активность, в исследуемых экстрактах по мере приближения к источнику загрязнения наблюдается в ряду $1 < 2 < 4 < 5 < 6 < 7$.

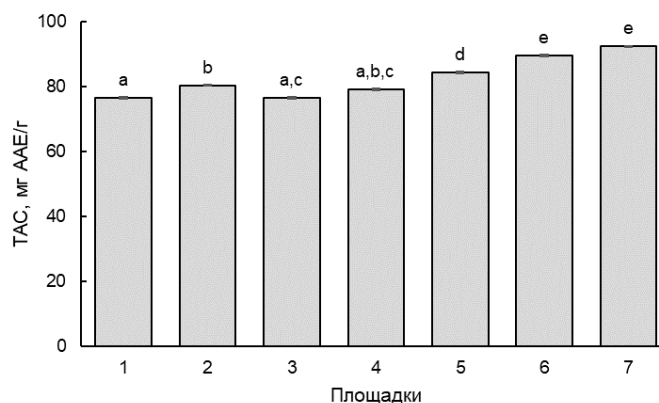


Рис. 3 Изменчивость содержания антиоксидантов в экстрактах вегетативных органах растений берёзы в условиях техногенного загрязнения ОАО «Комбинат Североникель» в 2021 г.

Для определения степени влияния токсичных элементов на синтез адаптогенных соединений вегетативными органами растений берёзы, проанализировано содержание тяжелых металлов в грунте (табл. 2). В качестве определяемых элементов выбраны тяжёлые металлы, входящие в состав выбросов медно-никелевого производства – Mn, Co, Ni, Cu, Zn и Pb [4]. Установлено, что исследуемая зона воздействия характеризуется нелинейной тенденцией накопления тяжелых металлов с максимальными концентрациями Ni, Zn, Mn и Cu в грунте – 1642.0, 558.0, 428.7 и 289.1 мг/кг⁻¹ на 7, 2 и 3 площадке, соответственно. Распределение стационарных площадок в ряду увеличения концентраций элементов осуществлялось следующим образом: $5 < 1 < 4 < 2 < 6 < 3 < 7$ (табл. 2).

Таблица 2

Содержание элементов (мг/кг⁻¹) в грунте на стационарных площадках, расположенных в зоне техногенного загрязнения ОАО «Комбинат Североникель»

Название элемента	Номер площадки						
	1	2	3	4	5	6	7
Mn	298.5	337.1	428.7	301.3	114.4	394.0	260.9
Co	7.67	16.8	33.1	15.9	7.16	33.4	59.2
Ni	41.0	144.7	520.7	194.3	100.7	559.1	1642.0
Cu	19.0	140.7	289.1	100.6	38.1	192.9	619.8
Zn	27.9	558.0	44.2	43.3	8.09	42.5	39.3
Pb	11.6	21.5	19.4	8.64	2.47	8.94	15.0

Проведенный корреляционный анализ показал, что Co, Zn и Pb оказывают умеренное ($r = 0.4$) и среднее ($r = 0.6$) влияние на сумму флавоноидов в экстрактах листьев растений берёзы, и очень слабое ($r = 0.1$), и среднее ($r = 0.5$ и 0.6) в отношении

их влияния на содержание антиоксидантов, соответственно, оставшиеся элементы – Mn, Ni и Cu – содержащиеся в более высоких концентрациях, демонстрируют обратную ($r = -0.6 - -0.9$) взаимосвязь между синтезом фенольных соединений и содержанием тяжёлых металлов в грунте, что может свидетельствовать о наличии факторов, влияющих на интенсивность синтеза фенольных соединений, помимо реакции на стресс от техногенного загрязнения.

В настоящее время всё больше исследований по изучению влияния техногенного воздействия на синтез фенольных соединений, указывают на то, что для растений характерна двухфазная зависимость содержания вторичных метаболитов от интенсивности техногенной нагрузки. Пока загрязнение не превышает норму реакции, наблюдается увеличение содержания синтезируемых метаболитов, но при увеличении нагрузки, происходит снижение их содержания [14-16]. Данная закономерность прослеживается и в результатах настоящей работы, на площадках с максимальными концентрациями тяжёлых металлов в грунте, зафиксированы наименьшие суммы флавоноидов, и наоборот – 1, 4 и 5 площадки, находящиеся в начале ряда возрастания концентрации токсикантов – показывают максимальные содержания адаптогенов, что дополнительно подтверждается отрицательными результатами корреляционного анализа. Подобные закономерности отмечены для листьев близкого вида *Betula pendula* Roth. [17] и проростков *Avena sativa* L. [18], где низкие концентрации свинца и сульфатов меди и цинка, соответственно, вызывали повышенный синтез каротиноидов, фенолов и флавоноидов, а высокие – снижали. В работе [13], описана обработка листьев *Matricaria chamomilla* L. никелем, способствующая увеличению синтеза хлорогеновой кислоты, обладающей высокой антиоксидантной активностью – в четыре раза, что может указывать на то, что растения, произрастающие в локальной зоне воздействия токсикантов, вырабатывают значительные концентрации фенолкарбоновых кислот.

Нужно отметить, что в условиях умеренного загрязнения (площадка 2) содержание флавоноидов синтезируемых листьями растений берёзы ниже, их содержания в условиях фона (площадка 1). Вероятно, данная тенденция свидетельствует о том, что усиленного биосинтеза фенольных соединений недостаточно для стабилизации жизнедеятельности растения, и необходима активация дополнительных протекторных механизмов [19], что согласуется с данными содержания фотосинтетических пигментов в *B. pendula*, произрастающей в условиях техногенного загрязнения [17, 20].

Выводы

Проанализирована зависимость синтеза флавоноидов и антиоксидантов от расстояния до источника техногенного загрязнения. Отмечен общий нелинейный характер пространственного распределения в отношении суммы флавоноидов, и линейный – для соединений, проявляющих антиоксидантную активность. Установлена нелинейная тенденция накопления тяжелых металлов с распределением стационарных площадок в ряду увеличения концентраций элементов: $5 < 1 < 4 < 2 < 6 < 3 < 7$.

Результаты анализа полученных данных позволяют рассматривать вегетативные органы берёзы пушистой в качестве потенциального источника фенольных адаптогенов. Они могут стать основой для проведения более детальных исследований влияния техногенного воздействия на синтез адаптогенных соединений в вегетативных органах растений, с целью лучшего понимания двухфазной зависимости содержания вторичных метаболитов от интенсивности техногенной нагрузки.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания
ФИЦ КНЦ РАН FMEZ-2023-0012.

Список литературы

1. Крючков В.В., Макарова Т.Д. Аэротехногенное воздействие на экосистемы Кольского Севера. Апатиты. – 1989. – 96 с.
2. Середа Л.Н., Жиров В.К., Цветов Н.С., Дрогобужская С.В. Изменчивость содержания адаптогенных соединений в различных органах *Empetrum hermaphroditum* Nager. в условиях техногенного загрязнения на Кольском полуострове // Химия растительного сырья. – 2024. – №2. – С. 293-301. DOI: 10.14258/jcprtm.20240213032.21.
3. Бейдеман И.Н. Методика фенологических наблюдений при геоботанических исследованиях. – М.; Л. – 1954. – 130 с.
4. ОФС.1.1.0011.15 Хранение лекарственного растительного сырья и лекарственных растительных препаратов // Государственная фармакопея РФ. XIV изд. – М., 2018.
5. 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.
6. Berni R., Luuyckx M., Xu X., Legay S., Sergeant K., Hausman J., Lutts S., Cai G., Guerriero G. Reactive oxygen species and heavy metal stress in plants: Impact on the cell wall and secondary metabolism // Environmental and Experimental Botany. – 2019. – Vol. 161. – p. 98-106. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2018.10.017
7. Calabrese E.J., Blain R.B. Hormesis and plant biology // Environmental pollution. – 2009. – Vol. 157(1). – p. 42-48. DOI: 10.1016/j.envpol.2008.07.028
8. Erofeeva E.A. Estimating the frequency of hormesis and other non-monotonic responses in plants experiencing road traffic pollution in urban areas and experimental pollutant exposure // Environmental Monitoring and Assessment. – 2020. – Vol. 192(7). – p. 460. DOI: 10.1007/s10661-020-08418-8
9. Feduraev P., Skrypnik L., Nebreeva S., Dzhobadze G., Vatagina A., Kalinina E., Pungin A., Maslennikov P., Riabova A., Krol O., Chupakhina G. Variability of phenolic compound accumulation and antioxidant activity in wild plants of some *Rumex* species (*Polygonaceae*) // Antioxidants. – 2022. – Vol. 11(2). – p. 311.
10. Kang Y., Yang L., Dai H., Xie M., Wang Y., Peng J., Sun H., Ao T., Chen W. Antioxidant system response, mineral element uptake and safe utilization of *Polygonatum sibiricum* in cadmium-contaminated soil // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11(1). – p. 18737. DOI: 10.1038/s41598-021-97998-7
11. Koptsik G.N., Koptsik S.V., Smirnova I.E. Effect of Soil Degradation and Remediation in Technogenic Barrens on the Uptake of Nutrients and Heavy Metals by Plants in the Kola Subarctic // Eurasian Soil Science. – 2021. – Vol. 54. – p. 1252-1264. DOI: 10.1134/S106422932108010X
12. Meier U. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants BBCH. – Quedlinburg. – 2018. – 204 p. DOI: 10.5073/20180906-074619.
13. 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. The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants – history and publications // Journal für Kulturpflanzen. – 2009. – Vol. 61. – p. 41-52. DOI: 10.5073/JfK.2009.02.01.
14. Mengdi X., Wenqing C., Haibo D., Xiaoqing W., Li Y., Yuchen K., Hui S., Lei W. Cadmium-induced hormesis effect in medicinal herbs improves the efficiency of safe

utilization for low cadmium-contaminated farmland soil // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2021. – Vol. 225. – p. 112724. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.112724

15. Petukhov A.S., Petukhova G.A. Biochemical protective mechanisms in the accumulation of heavy metals in organisms // *Gigiena i Sanitariia*. – 2017. – Vol. 96(2). – p. 114-117.

16. Santiago L.J.M., Louro R.P., De Oliveira D.E. Compartmentation of phenolic compounds and phenylalanine ammonia-lyase in leaves of *Phyllanthus tenellus* Roxb. and their induction by copper sulphate // *Annals of botany*. – 2000. – Vol. 86(5). – p. 1023-1032. DOI: 10.1006/anbo.2000.1271

17. 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). – p. 67-83. DOI: 10.1007/s10653-022-01263-3.

18. Vinogradova N.A., Glukhov A.Z. Ecological and phytochemical features of *Crataegus fallacina* Klokov under conditions of technogenic pollution // *Contemporary Problems of Ecology*. – 2021. – Vol. 14. – p. 90-97. DOI: 10.1134/S1995425521010091

19. Vinogradova N., Vinogradova E., Chaplygin V., Mandzhieva S., Kumar P., Rajput V.D., Minkina T., Seth C.S., Burachevskaya M., Lysenko D., Singh R.K. Phenolic compounds of the medicinal plants in an anthropogenically transformed environment // *Molecules*. – 2023. – Vol.28(17). – p. 6322. DOI: 10.3390/molecules28176322

20. Yakovleva A.I., Okhlopkova E.D., Olesova L.D., Krivoshapkina Z.N., Konstantinova L.I., Grigorieva A.A., Semenova E.I., Efremova A.V., Mironova G.E. Influence of cement plant emissions on medicinal properties of medicinal plants in central Yakutia // *Yakutia Med. J.* – 2019. – Vol. 2. – p. 38-41.

Статья поступила в редакцию 12.08.2024 г.

Sereda L.N., Zhirov V.K., Dorogobuzhskaya S.V. Variability of the content of adaptogenic compounds in the vegetative organs of *Betula pubescens* Ehrh. in conditions of technogenic pollution in the Arctic zone of the Russian Federation // *Bull. of the State Nikita Botan. Gard.* – 2025. – № 154. – P. 87-94

The study of the features of the synthesis of secondary metabolites of plants under industrial conditions is of great importance for understanding the mechanisms of formation of plant tolerance to man-made stress and the diagnosis of the state of the environment. The dynamics of the accumulation of adaptogenic metabolites makes it possible to detect the first stages of contamination before the first visual signs of damage to plants appear. An important factor in the enhanced synthesis of secondary metabolites by plants growing on the territory of the Kola Peninsula is the man-made load of the “Severonikel” copper-nickel combine, whose emissions contain heavy metals. The pubescent birch (*Betula pubescens* Ehrh.), which leaves contain a significant amount of phenolic compounds, is often chosen as a model species for analyzing the effects of man-made pollution. The purpose of this work was to study the variability of the content of adaptogenic compounds in the vegetative organs of *Betula pubescens* Ehrh., growing in conditions of technogenic pollution. As a result of the work, the dependence of the synthesis of flavonoids and antioxidants on the distance to the source of man-made pollution was analyzed. The general nonlinear character of the spatial distribution with respect to the amount of flavonoids is noted, and linear – for compounds exhibiting antioxidant activity. A nonlinear tendency of accumulation of heavy metals has been established.

Key words: *Betula pubescens* Ehrh.; biologically active substances; technogenic pollution; ultrasound-assisted extraction; Arctic