

Влияние техногенного стресса на содержание биологически активных соединений в листьях *Betula czerepanovii* на Кольском полуострове

Е. П. ХРАМОВА, И. Е. ЛОБАНОВА, Т. М. ШАЛДАЕВА, Е. Г. ЗИБЗЕЕВ

Центральный сибирский ботанический сад СО РАН
630090, Новосибирск, ул. Золотодолинская, 101

E-mail: elenakhramova2023@yandex.ru, egzibzeev@yandex.ru

Статья поступила 17.10.2024

После доработки 26.11.2024

Принята к печати 27.11.2024

АННОТАЦИЯ

Исследован комплекс биологически активных соединений в водно-этанольных экстрактах листьев *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii* в зоне воздействия предприятий компании “Норникель” (Кольский дивизион). Определено общее содержание фенольных соединений, флавоноидов, танинов, фенолокислот, фотосинтетических пигментов (хлорофиллы и каротиноиды) спектрофотометрическим методом и оценена антирадикальная активность. С повышением техногенного воздействия содержание фенольных соединений увеличивалось, что указывает на возможность использовать эти соединения для мониторинга и диагностики состояния окружающей среды. В большей мере ответная реакция растений на стресс проявилась для катехинов и общего содержания фенольных соединений, концентрация которых в зоне максимального воздействия возросла в 1,4–1,7 раза по сравнению с фоном. Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллы, каротиноиды) в листьях березы снижалось в 1,5–1,9 раза по мере приближения к источнику загрязнения. Водно-этанольные экстракты листьев березы с полигонов, находящихся в непосредственной близости от промышленных объектов предприятия, обладали более высокой антирадикальной активностью ($IC_{50} = 0,07$ мг/мл), что, возможно, связано с повышенным содержанием катехинов. Показано, что в градиенте техногенного загрязнения вариабельность содержания биологически активных соединений в листьях *B. pubescens* ssp. *czerepanovii* снижалась.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*, фенольные соединения, фотосинтетические пигменты, антирадикальная активность.

ВВЕДЕНИЕ

Betula pubescens ssp. *czerepanovii* (N. I. Orlova) Hämet-Ahti (береза Черепанова) – гипоарктический евросибирский вид, относится к одному из основных лесообразующих видов деревьев в субарктических районах северной России и Скандинавии [Kozlov, Zvereva, 2004; Василевская, 2021].

В зоне воздействия предприятий Кольской горно-металлургической компании (ГМК) (г. Мончегорск) *B. pubescens* ssp. *czerepanovii* присутствует во всех типах сообществ, вне зависимости от степени их нарушенности [Василевская, 2021]. Промышленные эмиссии, поступающие в окружающую среду, аккумулируются листьями, что вызывает развитие

окислительного стресса у растений, который часто приводит к интенсивной генерации в клетках активных форм кислорода (АФК) [Мерзляк, 1999; Шавнин и др., 2014]. Важная роль в антиоксидантной системе защиты клеток от действия АФК отводится фенольным соединениям, которые представляют собой одни из наиболее распространенных вторичных метаболитов растений [Запрометов, 1993; Pietta, 2000; Меньщикова и др., 2006; Загоскина, Назаренко, 2016; Vinogradova et al., 2023]. Эффективность фенольных соединений как антиоксидантов зависит от их структурных особенностей, таких как катехольная структура в кольце В, 2,3-двойные связи в сопряжении с 4-оксо-функцией в кольце В, гидроксильные группы в положениях 3 в кольце С и 5 – в кольце А [Тараховский и др., 2013; Banjarnahor, Artanti, 2014; Foti, Amorati, 2016]. Наиболее чувствительными в этом отношении соединениями являются флавоноиды (рутин, кверцетин) [Загоскина, Назаренко, 2016].

Из других классов биологически активных соединений протекторные свойства и способность участвовать в защитных механизмах при воздействии промышленных выбросов и других неблагоприятных факторов проявляют пигменты растений. Например, каротиноиды в условиях стресса удаляют избытки свободных радикалов и активных форм кислорода, защищая липидный бислой мембран и хлорофиллы от разрушения [Устойчивость..., 2010; Чупахина и др., 2012; Загоскина, Назаренко, 2016].

Российскими и зарубежными учеными с 90-х годов прошлого столетия проводятся исследования воздействия выбросов медно-никелевых комбинатов на территории Мурманской области и Финляндии (г. Харьявалта) на состав и содержание фенольных соединений берез. Выявлено, что содержание некоторых низкомолекулярных фенольных соединений в листьях березы пушистой (*Betula pubescens* sl.) выше на загрязненных участках, чем в контроле [Loronen et al., 1997, 1998]. В 2001 г. на примере *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*, произрастающей в 7–65-километровой зоне в южном направлении от предприятий г. Мончегорска, показано, что содержание катехинов и производных галловой кислоты значительно снизилось, а флавонолов, напротив, повысилось по мере удаления от комбината, содер-

жание производных оксикоричных кислот при этом не изменилось [Loronen et al., 2001]. В результате авторами сделан вывод, что в листьях березы, произрастающей в условиях большего влияния предприятия, наблюдается как ускорение, так и замедление процессов фенольного биосинтеза, изменчивость в содержании фенольных компонентов или изменения в соотношениях между отдельными компонентами, что может трактоваться как нарушение фенольного метаболизма растений.

Исследование изменений накопления фенольных соединений и пигментов в листьях *B. pubescens* ssp. *czerepanovii* в зоне воздействия крупного предприятия цветной металлургии на Кольском полуострове и оценка их состояния продолжают быть актуальными и в настоящее время.

Цель исследования заключалась в изучении изменений в содержании биологически активных соединений в листьях *B. pubescens* ssp. *czerepanovii* с удалением от предприятий Кольской ГМК.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проведены в 2022 и 2023 гг. в рамках Большой научной экспедиции, организованной СО РАН и компанией “Норильский никель”. В качестве модельного объекта выбрана *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii* (береза Черепанова), широко распространенная на территории Кольского полуострова. Образцы листьев березы собраны в третьей декаде июня 2022 и 2023 гг. на восьми участках с разной удаленностью к югу от предприятий Кольской ГМК г. Мончегорска (рис. 1, табл. 1).

Метеорологические условия двух лет различались: июнь 2022 г. был более холодным и дождливым, чем в 2023 г. Так, максимальная температура воздуха в 2023 г. в первой половине третьей декады на 7 °С выше по сравнению с 2022 г., в котором она не превышала +15–20 °С, осадков выпало в 2022 г. на 30 % больше, чем в 2023 г. [Обзор...<https://kolgimet.ru/obzor-meteorologicheskikh-uslovii-za-ijun>, обращение 05.08.2024]. На каждом участке выбрано по 10 модельных деревьев, с которых брали по 10 листьев, упаковывали в бумажные пакеты и доставляли в лабораторию. Образцы высушивали в проветриваемом помещении без доступа солнечных лучей, затем

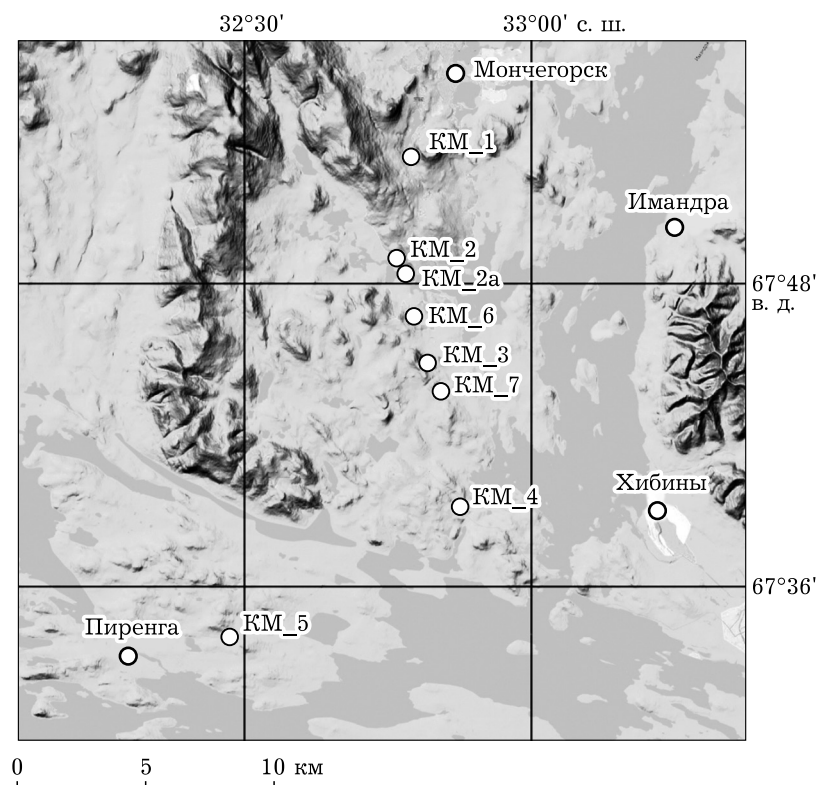


Рис. 1. Участки работ

их измельчали до 1–2 мм и отбирали среднюю пробу. В 2022 г. готовилась одна средняя проба с 10 особей с каждого из пяти участков. В 2023 г. – с каждого из 10 деревьев.

Подготовка растительных экстрактов

Около 1,000 г (точная навеска) сырья, проходящего сквозь сито с диаметром отверстий 2–3 мм, трижды экстрагировали 70 % этиловым спиртом в колбе с обратным холодильником на кипящей водяной бане по 30 мин. Экстракты фильтровали через бумажный фильтр, объединяли и измеряли общий объем. Одновременно брали 1,000 г (точная навеска) сырья и высушивали при $T = 104\text{ }^{\circ}\text{C}$ до постоянной массы для расчета абсолютно сухой массы.

Определение содержания биологически активных соединений (БАС) проводили спектрофотометрическим методом с использованием спектрофотометра СФ-56 (ЛОМО, Россия).

Общее содержание фенольных соединений

Общее содержание фенольных соединений определяли с использованием реактива

Фолина – Чекальтеу с небольшой модификацией [Ardestani, Yazdanparast, 2007]. 0,5 мл экстракта смешивали с 2,5 мл реагента Фолина – Чекальтеу (разбавленного дистиллированной водой 1 : 10). Затем добавляли 2,0 мл водного раствора карбоната натрия (7,5 %) и инкубировали в темноте при $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 15 минут. Поглощение измеряли при $\lambda = 76\text{ нм}$. Результаты общего содержания фенольных соединений выражали в миллиграммах эквивалента галловой кислоты (ГК) на грамм образца (мг ГКЭ/г образца) [Ardestani, Yazdanparast, 2007].

Общее содержание флавонолов

Общее содержание флавонолов определяли методом, основанном на реакции хлористого алюминия с флавонолами [Государственная фармакопея..., 2018]. В одну пробирку с 0,1 мл экстракта прибавляли 0,2 мл 2 % спиртового раствора хлорида алюминия, в другую – 1–2 капли 30 % уксусной кислоты и доводили до метки 96%-м этанолом (до 5 мл). Инкубировали в течение 40 минут, поглощение измеряли при $\lambda = 415\text{ нм}$. Концентрацию флавонолов определяли по калибровочной кривой,

Т а б л и ц а 1
Содержание фенольных соединений в листьях *Betula pubescens ssp. czegeanovii*

Полигон	Расстояние от предприятия Кольской ГМК, км	Фенольные соединения, мг-экв. ГК/г абс. сух. массы	Фенолокислоты, мг-экв. КК/г абс. сух. массы	Флавонолы, мг-экв. Рут/г абс. сух. массы	Катехины, мг-экв. (+)Кат/г абс. сух. массы	Танины, мг-экв. Т/г абс. сух. массы
2022 г. (средний образец из участка)						
КМ_1	0,7	50,16 ± 1,99*	122,69 ± 4,91	55,30 ± 1,66	20,84 ± 0,36	169,81 ± 1,44
КМ_2	7,0	68,68 ± 2,73	113,84 ± 4,55	38,99 ± 1,17	28,61 ± 0,49	188,66 ± 1,60
КМ_3	15	44,90 ± 1,78	81,21 ± 3,25	37,65 ± 1,13	16,41 ± 0,28	150,83 ± 1,28
КМ_4	30	40,05 ± 1,59	69,11 ± 2,76	41,98 ± 1,26	20,96 ± 0,36	122,25 ± 1,04
КМ_5	40	50,96 ± 2,02	85,71 ± 3,43	37,43 ± 1,12	17,67 ± 0,30	146,27 ± 1,24
2023 г. (средний образец с каждой отдельной особи на участке, n = 10)						
КМ_1	1,2	90,52 ± 11,21 (12)	105,40 ± 14,11 (13)	47,28 ± 5,64 (12)	36,87 ± 5,16 (14)	211,03 ± 25,70 (12)
КМ_2а	10	84,17 ± 13,80 (16)	95,81 ± 13,09 (14)	48,05 ± 8,50 (18)	34,06 ± 6,00 (18)	196,84 ± 24,57 (12)
КМ_6	14	78,54 ± 9,42 (16)	91,64 ± 11,57 (13)	42,07 ± 5,22 (12)	35,25 ± 4,64 (13)	180,41 ± 22,91(13)
КМ_7	20	81,27 ± 13,02 (12)	95,99 ± 12,73 (13)	45,62 ± 7,46 (16)	34,16 ± 4,91 (14)	190,40 ± 38,64 (21)
КМ_5	40	64,91 ± 13,94 (21)	84,13 ± 15,19 (18)	39,24 ± 4,74 (12)	25,72 ± 10,65 (41)	160,55 ± 18,16 (11)

П р и м е ч а н и е. * – среднее содержание ± стандартное отклонение (df = 9, p = 0,95); в скобках – коэффициент вариации (C_v, %).

построенной с использованием стандартного образца рутина (Sigma-Aldrich). Результаты общего содержания флавонолов выражали в миллиграммах эквивалента рутина (Р) на грамм образца (мг РЭ/г образца)

Общее содержание катехинов

Общее содержание катехинов (или флаван-3-олов) определяли методом, основанном на способности катехинов давать малиновое окрашивание с раствором ванилина в концентрированной соляной кислоте [Кукушкина и др., 2024]. В две мерные пробирки переносили по 0,8 мл водно-этанольного извлечения, в одну из них прибавляли 4,2 мл 1 % раствора ванилина в концентрированной соляной кислоте. Объем обеих пробирок доводили до 5 мл концентрированной соляной кислотой. Пробирка без ванилина служила в качестве раствора сравнения. Оптическую плотность раствора измеряли при $\lambda = 502$ нм. В качестве стандарта использован ($\pm$) катехин фирмы Sigma (≥ 99 %). Результаты выражали в миллиграммах эквивалента ($\pm$) катехин (К) на грамм образца (мг КЭ/г образца / г эквивалента (+)-катехин).

Общее содержание танинов

Определение танинов (гидролизуемых дубильных веществ) проводили с использованием раствора аммония молибденово-кислого в пересчете на танин [Федосеева, 2005]. К 10 мл экстракта добавляли 10 мл 2 % водного раствора аммония молибденово-кислого, доводили до 100 мл дистиллированной водой и инкубировали в течение 15 мин, поглощение измеряли при $\lambda = 420$ нм. В качестве стандартного образца использовали образец танина (Sigma-Aldrich, США, CAS 1401-55-4). Результаты выражали в мг-эквивалента Танин/г.

Общее содержание фенолокислот

Содержание фенолокислот (гидроксикоричных) проводили с использованием реактива Арнова в пересчете на кофейную кислоту [Polish Pharmacopeia VI, 2002]. В пробирку добавляли 6 мл дистиллированной воды, 10 мл 0,1 н соляной кислоты, 1 мл реактива Арнова, 0,1 н натрия гидроксида и 1 мл экстракта. Пробирка без экстракта служила в качестве раствора сравнения. Оптическую плотность

раствора измеряли при $\lambda = 490$ нм. В качестве стандарта использована кофейная кислота фирмы Sigma (≥ 99 %). Результаты выражали в мг эквивалента кофейной кислоты (КК) на грамм образца (мг ККЭ/г образца/г эквивалента кофейной кислоты).

Содержание фотосинтетических пигментов

Содержание пигментов (каротиноидов и хлорофиллов *a* и *b*) определяли в ацетоно-во-этанольном извлечении [Кривенцов, 1982]. Навеску сырья 0,1 г растирали в ступке до однородной массы, добавляя последовательно 0,1 г кальция карбоната для нейтрализации органических кислот, так как каротиноиды неустойчивы в кислой среде, 1 мл диметилформамида для устойчивости пигментов и 2 г натрия сульфата безводного. Экстракцию каротиноидов проводили ацетоном (40 мл – 1 раз и далее по 10 мл – 2 раза), после чего продолжали экстрагировать 96 % этанолом (по 5 мл – 3 раза) для извлечения ликопина. Затем исчерпывающе экстрагировали ацетоном до исчезновения окраски. Измеряли объем объединенного извлечения [Кривенцов, 1982]. Оптическую плотность растворов для определения хлорофиллов *a* и *b* измеряли при $\lambda = 662$ и $\lambda = 644$ нм, для каротиноидов – при $\lambda = 440,5$ нм. Расчет концентрации пигментов проводили по общеизвестным формулам [Методы..., 1987].

Оценка антирадикальной активности

Антирадикальную активность (АРА) водно-этанольных экстрактов определяли по реакции со стабильным свободным радикалом DPPH (2,2-дифенил-1-пикрилгидразил) в 96 % этиловом спирте. По количеству вещества DPPH, вступающего в реакцию с 1 мл экстракта, оценивали АРА. В качестве контроля использовали тролокс ($IC_{50} = 7,49$ мкг/мл) и аскорбиновую кислоту ($IC_{50} = 8,69$ мкг/мл). Чем ниже концентрация прореагировавшего DPPH с экстрактом, тем выше АРА. Когда антиоксидант взаимодействует с DPPH, окраска пурпурно-синего цвета ослабевает из-за реакции восстановления. Этот процесс контролировался путем измерения изменения оптической плотности при $\lambda = 514$ нм стандартными

методами спектрофотометрии [Kumarasamy et al., 2007; Gawron-Gzella et al., 2016]. Расчет ингибирования (I) проводился по формуле:

$$I = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100 \%,$$

где A_0 – значение абсорбции холостого раствора DPPH; A – значение абсорбции рабочего раствора.

Дальнейшие расчеты проводились в программе GraphPad Prism 8 для вычисления значения IC_{50} , которое представляет собой количественный показатель эффективности лиганда в ингибировании биохимического или биологического взаимодействия. IC_{50} отражает количество ингибитора, необходимого для достижения 50 % ингибирования биологического процесса [Kumarasamy et al., 2007; Gawron-Gzella et al., 2016].

Статистическая обработка данных проводилась с помощью программ Statistica 8 и Microsoft Excel 2010. В качестве меры изменчивости использовали коэффициент вариации (C_v), определяемый как отношение стандартного отклонения к среднему в %. Его оценку проводили по шкале уровней изменчивости, предложенной С. А. Мамаевым [1972]. Уровень изменчивости считается очень низким при $C_v \leq 7 \%$, низким при $C_v = 8-12 \%$, средним при $C_v = 13-20 \%$, высоким при $C_v = 21-40 \%$ и очень высоким при $C_v > 40 \%$. Для определения формы и силы связи между содержанием фенольных соединений и факторами применялся регрессионный анализ. Теснота связи оценивалась по шкале: слабая ($0,1 < R^2 < 0,3$), умеренная ($0,3 < R^2 < 0,5$), за-

метная ($0,5 < R^2 < 0,7$), высокая ($0,7 < R^2 < 0,9$) и весьма высокая ($0,9 < R^2 < 0,99$). Множественные сравнения проводились с помощью однофакторного дисперсионного (одностороннего) анализа ANOVA с последующим тестом Тьюки на достоверно значимые различия для оценки значимости различий между средними значениями. Уровень значимости p установлен на уровне $< 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Фенольные соединения

Общее содержание фенольных соединений (ФС) в листьях *B. czerapanovii*, как правило, снижалось по мере удаления от источника загрязнения на 40–50 % (см. табл. 1). В 2022 г. оно изменилось от 60,68 мг/г на расстоянии 7 км (КМ_2) до 40,05 мг/г в листьях растений в 30-километровой удаленности (КМ_4) (см. рис. 1). В 2023 г. – в диапазоне от 90,52 мг/г вблизи источника загрязнения (1,2 км) до 64,91 мг/г в фоновых условиях (40 км) (КМ_5). Различия в содержании ФС в листьях берез из зон КМ_1, КМ_2а, КМ_7 с фоновым участком (КМ_5) статистически значимы (рис. 2).

Уровень вариабельности (C_v) по содержанию ФС в листьях оценивается как средний на участках, удаленных от 1,2 до 20 км, и высокий – на расстоянии 40 км (фоновый участок) ($C_v = 21 \%$) (см. табл. 1).

Фенольные соединения в листьях *B. czerapanovii* представлены флавоноидами (флавонолы и катехины), фенолокислотами (гидроксикоричные кислоты) и дубильными веществами (гидролизуемые танины).

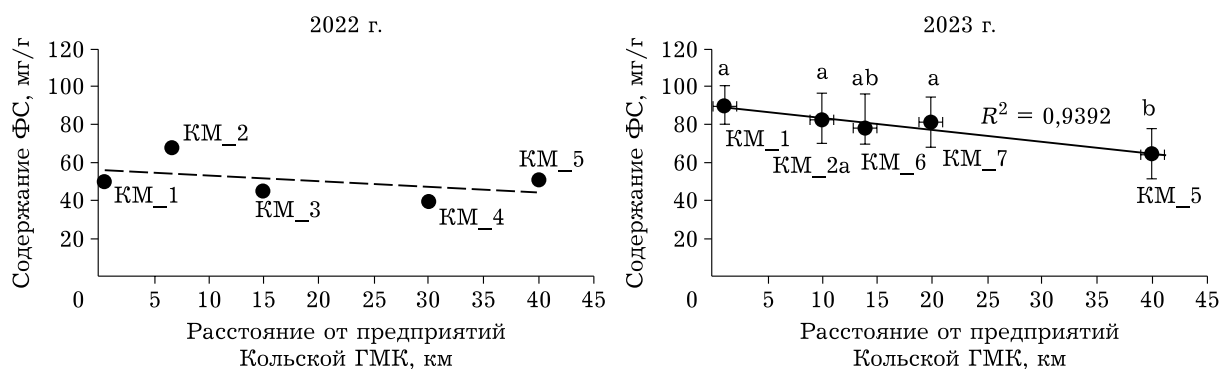


Рис. 2. Общее содержание фенольных соединений в листьях *Betula pubescens* ssp. *czerapanovii*, произрастающих на разном удалении от предприятий Кольской ГМК. Для результатов 2023 г. представлены средние значения определений образцов и их стандартные ошибки. Значения, достоверно различающиеся при $p < 0,05$, обозначены разными буквами (a, b) над столбцами

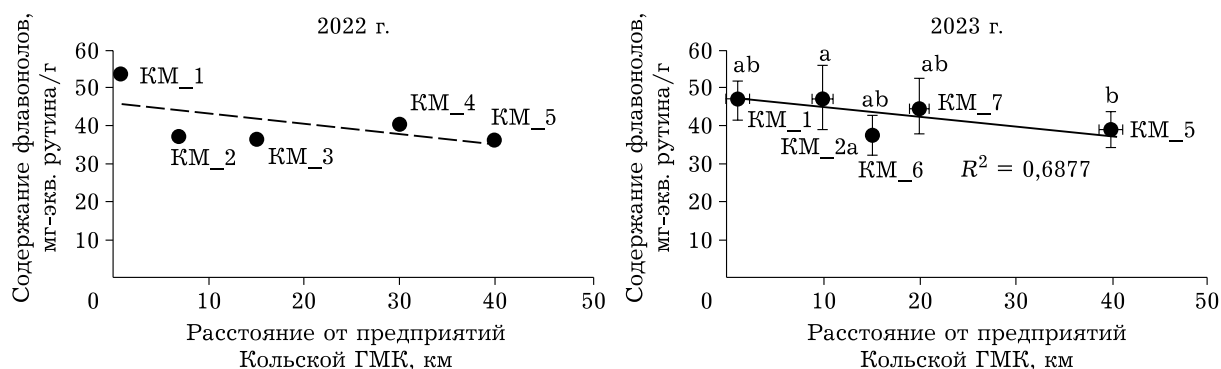


Рис. 3. Содержание флавонолов в листьях *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*, произрастающих на разном удалении от предприятий Кольской ГМК. Значения, достоверно различающиеся при $p < 0,05$, обозначены разными буквами (a, b) над столбцами

Содержание флавонолов (наиболее окисленной группы флавоноидов) в листьях березы в 2022 г. изменялось от 37,43 мг/г из фонового участка (КМ_5) до 55,30 мг/г из участка на расстоянии 0,7 км (КМ_1) (см. табл. 1). В 2023 г. диапазон варьирования составлял 39,24–48,05 мг/г, т. е. оставался практически на том же уровне, что и в 2022 г. (рис. 3).

В целом, содержание флавонолов в листьях *B. czerepanovii* снижалось по мере удаления от комбината “Североникель” в 1,2–1,5 раза, при этом статистически значимые отличия наблюдались между образцами из участков, удаленных на 10 км (КМ_2a) и 40 км (КМ_5) (см. рис. 3).

Содержание катехинов (наиболее восстановленной группы флавоноидов) в листьях *B. czerepanovii* также снижалось по мере удаления от комбината. В 2022 г. катехинов в листьях березы, произрастающих на расстоянии 7 км (КМ_2), было в 1,7 раза выше, чем в образцах, собранных на расстоянии 15 км от

источника (см. табл. 1, рис. 4). В 2023 г. концентрация катехинов варьировала от 25,72 мг/г (КМ_5) до 36,87 мг/г (КМ_1).

В фоновых условиях уровень изменчивости содержания катехинов в листьях выше, чем на участках под техногенным воздействием, и оценивался как очень высокий ($C_v = 41\%$). В зоне воздействия предприятия уровень изменчивости снижался и классифицировался как средний ($C_v = 13\text{--}18\%$).

Фенольные кислоты (гидроксикоричные) относятся к фенилпропаноидам ($C_6\text{--}C_3$) и являются веществами ароматической природы, содержащими одну или несколько гидроксильных групп у ароматического кольца. Это самые распространенные вторичные метаболиты растений [Запрометов, 1993]. Известно, что в условиях техногенной нагрузки их биосинтез, как правило, активизируется [Loponen et al., 2001].

Содержание фенолокислот в листьях березы в 2022 г. изменялось от 85,71 мг/г на фоновом участке до 122,69 мг/г на полигоне,

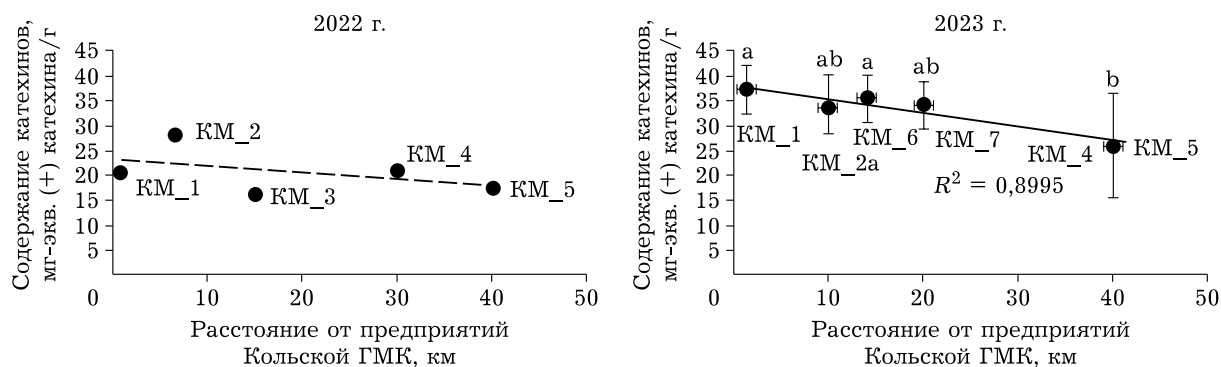


Рис. 4. Содержание катехинов в листьях *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*, произрастающих на разном удалении от предприятий Кольской ГМК. Представлены средние значения определений образцов и их стандартные ошибки

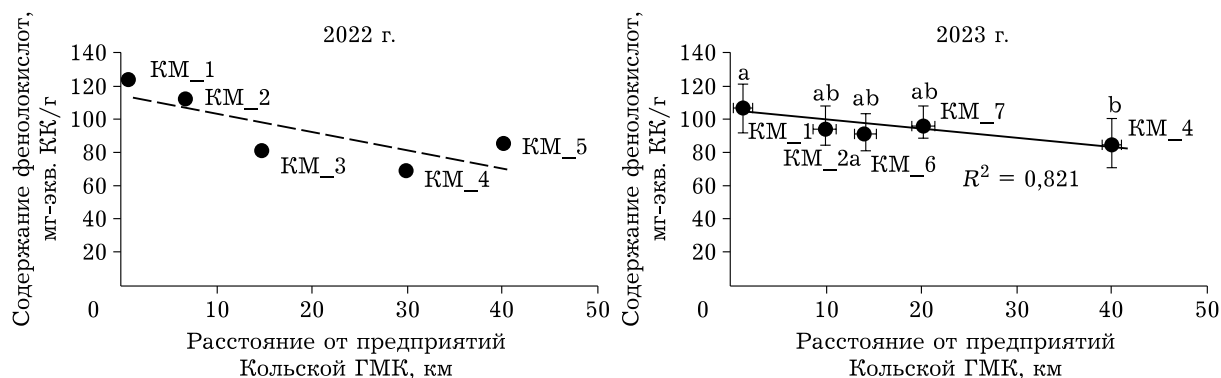


Рис. 5. Содержание фенолокислот в листьях *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*, произрастающих на разном удалении от предприятий Кольской ГМК

удаленном на 0,7 км. В 2023 г. наблюдалась аналогичная картина, диапазон варьирования составил от 84,13 до 105,40 мг/г (см. табл. 1, рис. 5).

Танины (гидролизуемые дубильные вещества) представляют собой полифенолы с большим количеством гидроксильных групп. Их содержание в листьях березы в зоне воздействия комбината “Североникель”, как правило, снижалось по мере удаления от источников загрязнения (см. табл. 1). В 2022 г. максимальное содержание (188,66 мг/г) отмечено в 7 км от источника загрязнения, а минимальное – в 30 км (122,53 мг/г) (см. рис. 5). В 2023 г. количество танинов снижалось от 211,03 мг/г в листьях березы на расстоянии 1,2 км до 160,55 мг/г на фоновом полигоне (40 км) (рис. 6). Более высокое накопление танинов отмечено в листьях березы из участка, приближенного к источнику загрязнения (КМ_1).

Основными фотосинтетическими пигментами листа являются хлорофиллы *a* и *b* и каротиноиды. В 2022 г. по минимальному содержанию пигментов выделены образцы из

участка КМ_2, расположенного на расстоянии 7 км от источника, максимальному – КМ_3 (15 км) (рис. 7, табл. 2). В 2023 г. по мере удаления от комбината “Североникель” наблюдалась тенденция повышения фотосинтетических пигментов в листьях *B. pubescens* ssp. *czerepanovii*, их содержание в листьях фоновых образцов статистически значимо отличалось от такового под техногенным воздействием (см. рис. 7).

Отношение хлорофиллов *a/b*, суммы хлорофиллов к каротиноидам и сумма хлорофиллов представлены в табл. 2.

Антирадикальную активность водно-этанольных экстрактов определяли по реакции со стабильным свободным радикалом DPPH в 96 % этиловом спирте. По количеству вещества DPPH, вступающего в реакцию с 1 мл экстракта, оценивали АРА. В качестве контроля использовали тролокс (IC_{50} 7,49 мкг/мл) и аскорбиновую кислоту (IC_{50} = 8,69 мкг/мл). Чем ниже концентрация прореагировавшего DPPH с экстрактом, тем выше АРА.

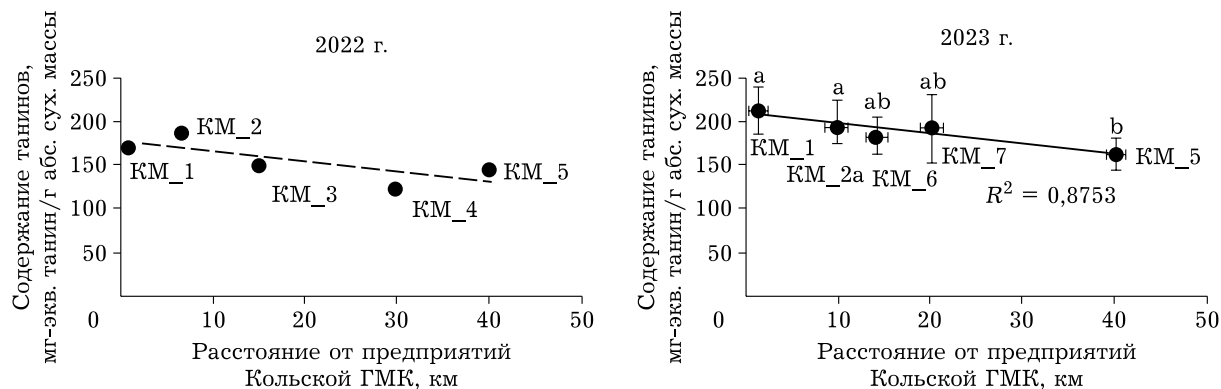


Рис. 6. Содержание танинов в листьях *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*, произрастающих на разном удалении от предприятий Кольской ГМК

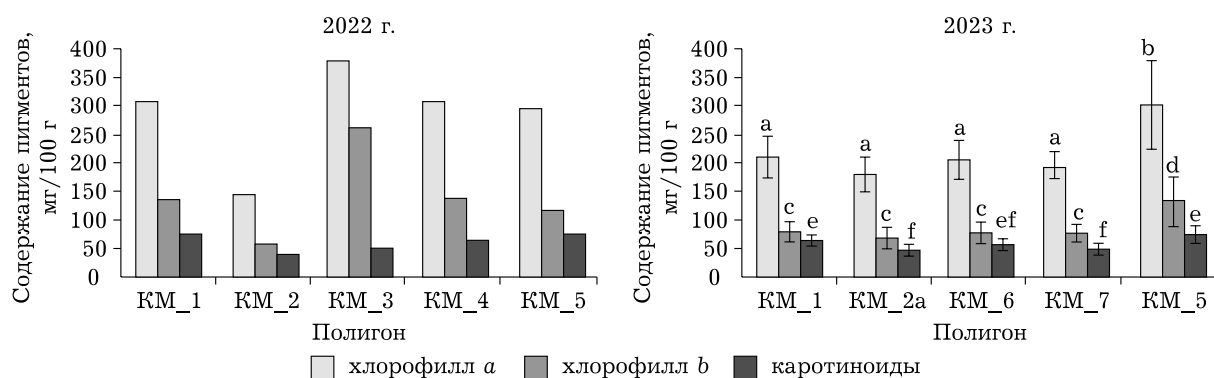


Рис. 7. Содержание пигментов в листьях *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*, произрастающих на разном удалении от предприятий Кольской ГМК

Самой высокой антирадикальной активностью ($IC_{50} = 0,07-0,08$ мг/мл) обладали водно-этанольные экстракты из листьев берез, произрастающих на расстоянии 7 км (KM_2) в 2022 г. и 0,7 км (KM_1) в 2023 г. (табл. 3).

С использованием регрессионного анализа показано, что антирадикальная активность водно-этанольных экстрактов листьев берез на 31 % определяется содержанием катехинов (рис. 8), на 15–17 % – содержанием танинов, флавонолов, фенолокислот. Это находит подтверждение в литературе, что антиоксидантные свойства многих растений в значительной мере обусловлены именно содержа-

ем флавоноидов, танинов и пигментов [Okawa et al., 2001; Su et al., 2007].

Выявлена связь накопления БАС в листьях *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii* с расстоянием от источника загрязнения (табл. 4). Для всех показателей значения коэффициентов корреляции статистически значимы. Для фенольных соединений связь отрицательная, что свидетельствует об активации биосинтеза этих соединений по мере возрастания техногенной нагрузки. Для пигментов, напротив, связь положительная и показывает, что с увеличением расстояния от источника загрязнения содержание хлорофиллов *a* и *b*, ка-

Т а б л и ц а 2
Содержание пигментов (мг/100г) в листьях *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*

Полигон	Хлорофилл <i>a</i> , мг/100г	Хлорофилл <i>b</i> , мг/100г	Каротиноиды, мг/100г	Хл <i>a</i> + Хл <i>b</i> , мг/100г	Хл <i>a</i> /Хл <i>b</i>	(Хл <i>a</i> +Хл <i>b</i>)/ каротиноиды
2022 г. (средний образец из участка)						
KM_1	305,19	131,07	76,07	436,26	2,3	5,7
KM_2	144,57	54,91	39,47	199,48	2,6	5,1
KM_3	377,99	262,15	50,73	640,14	1,4	12,6
KM_4	305,85	136,83	63,52	442,68	2,2	7,0
KM_5	294,16	114,50	73,49	408,66	2,6	5,6
2023 г. (средний образец с каждой отдельной особи на участке, $n = 10$)						
KM_1	212,68 ± 31,85* (15)	77,29 ± 18,25 (24)	62,97 ± 6,96 (11)	289,97	2,8	4,6
KM_2a	182,11 ± 29,61 (16)	70,26 ± 14,99 (21)	49,13 ± 5,38 (11)	252,37	2,6	5,1
KM_6	205,42 ± 32,96 (16)	75,26 ± 14,04 (19)	58,79 ± 8,73 (15)	280,68	2,7	4,8
KM_7	194,68 ± 23,47 (12)	78,01 ± 12,02 (15)	50,59 ± 4,89 (10)	272,69	2,5	5,4
KM_5	301,25 ± 79,32 (26)	130,24 ± 41,34 (32)	72,12 ± 15,08(21)	431,49	2,3	6,0

П р и м е ч а н и е. * – среднее содержание ± стандартное отклонение ($df = 9$; $p = 0,95$); в скобках – коэффициент вариации (C_v , %).

Т а б л и ц а 3

Антирадикальная активность водно-этанольных экстрактов из листьев *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*

2022 г.		2023 г.	
Полигон	IC ₅₀ , мг/мл	Полигон	IC ₅₀ , мг/мл
КМ_1	0,09 ± 0,01*	КМ_1	0,08 ± 0,01 (12)
КМ_2	0,07 ± 0,01	КМ_2a	0,09 ± 0,02 (18)
КМ_3	0,12 ± 0,02	КМ_6	0,09 ± 0,02 (20)
КМ_4	0,13 ± 0,02	КМ_7	0,08 ± 0,01 (17)
КМ_5	0,11 ± 0,02	КМ_5	0,14 ± 0,02 (17)

П р и м е ч а н и е. * – среднее содержание ± стандартное отклонение ($df = 9$; $p = 0,95$); в скобках – коэффициент вариации (C_v , %).

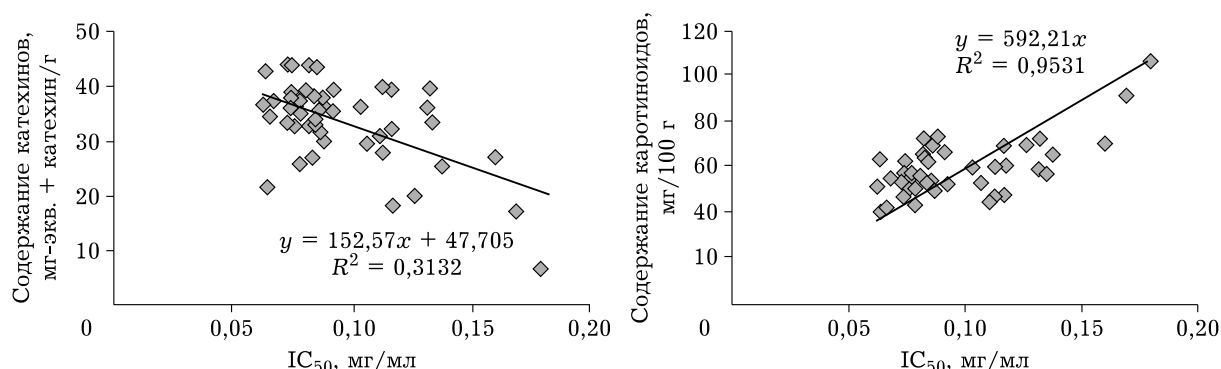


Рис. 8. Связь между содержанием БАС водно-этанольных экстрактов листьев *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii* с антирадикальной активностью ($N = 50$)

Т а б л и ц а 4

Корреляционная матрица содержания БАС и расстояние от предприятий Кольской ГМК, км

Вариант	Расстояние	ФС	ФК	Флавонолы	Катехины	Танины	Хл а	Хл б	Каротиноиды
Расстояние	1								
ФС	-0,56	1							
ФК	-0,42	0,90	1						
Флавонолы	-0,42	0,21	0,16	1					
Катехины	-0,49	0,76	0,62	0,04	1				
Танины	-0,51	0,78	0,77	0,48	0,44	1			
Хл а	0,60	-0,58	-0,40	-0,30	-0,58	-0,38	1		
Хл б	0,65	-0,63	-0,46	-0,28	-0,61	-0,43	0,98	1	
Каротиноиды	0,41	-0,37	-0,18	-0,27	-0,45	-0,16	0,90	0,83	1

П р и м е ч а н и е. Жирным шрифтом выделены значения, статистически значимые при $p < 0,0005$, $N = 50$.

ротиноидов увеличивается, что находит подтверждение в литературных источниках [Uka et al., 2021].

ОБСУЖДЕНИЕ

Наше исследование комплекса БАС и антирадикальной активности водно-этаноль-

ных экстрактов из листьев *B. pubescens* ssp. *czerepanovii* выявило изменения в их содержании по мере удаления от производственного комплекса ГМК г. Мончегорска.

Основные классы фенольных соединений в листьях березы – флавоноиды (флавонолы, катехины), фенилпропаноиды (фенолокислоты) и танины – в целом реагировали на загряз-

нение одинаково. С повышением техногенного стресса содержание фенольных соединений увеличивалось, что указывает на возможность использовать эти соединения для мониторинга. Кроме того, характер изменений фенольных соединений растений может быть связан с условиями произрастания, периодом развития, климатическими факторами окружающей среды, в связи с чем погодичный отбор образцов в нескольких точках отбора вдоль градиента загрязнения позволит снизить влияние на фенольный метаболизм других факторов. В данном исследовании полученные результаты вполне удовлетворяют этим требованиям, поскольку образцы отобраны на пяти участках в течение двух лет и объем выборки составил по 10 особей на каждом участке.

Результаты данного исследования показали, что общее содержание фенольных соединений в листьях березы изменялось в 1,3–1,4 раза с расстоянием от комбината. Максимум содержания фенольных соединений не всегда обнаруживался в образцах листьев, расположенных вблизи комбината. Так, в 2022 г. более высокое содержание фенольных соединений установлено в листьях растений, произрастающих в 7 км (КМ_2) от промышленных объектов предприятия (см. рис. 1), что согласуется с результатами других исследований [Loponen et al., 2001; Bialonska et al., 2007; Afanasyeva, Kashin, 2015]. В 2023 г. максимум накопления ФС отмечен в листьях берез, произрастающих на расстоянии 0,7–1,0 км от комбината (КМ_1) (см. рис. 2).

Содержание флавонолов в листьях березы в 2022 и 2023 гг. снижалось по мере удаления от промышленного комплекса в 1,2–1,5 раза, при этом статистически значимые отличия наблюдались только между образцами из участков, удаленных на 7 км (КМ_2а) и 40 км (КМ_5) (см. рис. 3). В целом, содержание флавонолов выше в листьях растений вблизи от источника загрязнения на расстоянии 0,7–10 км по сравнению с удаленными на расстоянии 14–40 км от медеплавильного завода.

Максимум катехинов в листьях березы в 2022 г. установлен на расстоянии 7 км от комбината, что выше фонового в 1,7 раза. При этом в непосредственной близости от производственного комплекса на расстоянии 0,7 км (КМ_1) и 15 км (КМ_3) содержание катехинов составило 20,84 и 16,41 мг/г соответствен-

но. Отмечено, что в разные годы уровень катехинов отличается. Так, в 2023 г. содержание катехинов в 1,5–2 раза выше, чем в 2022 г., что, может быть, связано с метеорологическими особенностями: последняя декада июня 2022 г., более прохладная и дождливая, чем в 2023 г. Статистически значимые различия в содержании катехинов с фоновыми образцами сбора 2023 г. отмечены между полигонами КМ_1, КМ_6 и КМ_5. Этот вывод согласуется с результатами других исследований, показывающих, что катехин имеет тенденцию накапливаться в тканях растений, подвергшихся воздействию загрязняющих веществ [Loponen et al., 1998, 2001].

Накопление гидролизуемых танинов в листьях березы, так же как и катехинов, выше на 10–55 % в 2023 г., чем в 2022 г., что, возможно, связано с метеорологическими особенностями. Максимум отмечен в образцах вблизи от производственного комплекса на расстоянии 0,7–15 км, результаты статистически значимы.

Содержание фенолокислот (гидроксикоричные кислоты) в листьях березы в 2022–2023 гг. в зоне влияния комбината снижалось по мере удаления от производственного комплекса на 25–40 %. Статистически значимые различия отмечены только между образцами из полигонов КМ_1 и КМ_5.

Повышение накопления катехинов, флавонолов, гидролизуемых танинов и гидроксикоричных кислот в условиях техногенного загрязнения позволяет отнести биосинтез этих фенольных соединений к неспецифическим механизмам адаптации растений к высоким концентрациям поллютантов, а их содержание использовать в качестве индикатора загрязнения территорий.

Кроме фенольных соединений антиоксидантную активность проявляют фотосинтетические пигменты – хлорофиллы и каротиноиды. Изменения в содержании и соотношении хлорофиллов и каротиноидов является одним из биохимических показателей реакции растений на изменение факторов внешней среды, степени их адаптации к новым экологическим условиям. По мере удаления от производственного комплекса содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллы *a* и *b*, каротиноиды) в листьях березы, как правило, увеличивалось. Минимум содержания хлорофиллов *a* и *b* и каротиноидов в листьях отме-

чен в листьях берез, произрастающих на полигонах КМ_2 и КМ_2а вне зависимости от года наблюдения. При этом отмечено, что различия в содержании пигментов статистически значимы между полигонами, находящимися в зоне влияния, и фоновым.

Хорошо известно, что изменения в содержании и соотношении хлорофиллов и каротиноидов является одним из биохимических показателей реакции растений на изменение факторов внешней среды, степени их адаптации к новым экологическим условиям. При оценке фотосинтетической продуктивности растительных тканей принимается во внимание отношение хлорофиллов a/b , которое при оптимальных условиях роста и развития растений приближается к 3 [Биохимические методы..., 1971]. Однако оно может варьировать в зависимости от вида растения, условий обитания, стадии развития и других факторов [Зубова и др., 2019; Маслова и др., 2020]. Наибольшее значение отношения хлорофиллов a/b обнаружено в листьях берез, произрастающих на расстоянии до 20 км в 2022 г., до 30 км в 2023 г. По мере удаления от источника загрязнения значение отношения хлорофиллов a/b снижается от 2,8 на участке КМ-1 до 2,3 на фоновом участке КМ-5, а величина отношения сумма хлорофиллов/каротиноиды, как правило, возрастает.

В ходе исследования оценена АРА. Установлено, что максимальной АРА обладают водно-этанольные экстракты листьев *B. pubescens* ssp. *czerepanovii*, отобранные на расстоянии 7–10 км (КМ_2) и в непосредственной близости к промышленному комплексу (КМ_1). Особенно выделяется образец из точки отбора, находящейся на расстоянии 7 км от предприятия (КМ_2, $IC_{50} = 0,07$ мг/мл).

С использованием регрессионного анализа показано, что АРА водно-этанольных экстрактов листьев березы на 31 % определяется содержанием катехинов (см. рис. 7), на 15–17 % – содержанием танинов, флавонолов, фенолокислот. Это находит подтверждение в литературе, что антиоксидантные свойства многих растений в значительной мере обусловлены именно содержанием флавоноидов, танинов и пигментов [Okawa et al., 2001; Su et al., 2007].

Выявлена связь накопления БАС в листьях *B. pubescens* ssp. *czerepanovii* с расстоянием от промышленного комплекса ГМК (см. табл. 4).

Для всех показателей значения коэффициентов корреляции статистически значимы. Для фенольных соединений связь отрицательная, что свидетельствует об активации биосинтеза этих соединений по мере возрастания техногенной нагрузки. Для пигментов, напротив, связь положительная и показывает, что с увеличением расстояния от предприятия содержание хлорофиллов a и b , каротиноидов увеличивается, что находит подтверждение в литературных источниках [Uka et al., 2021].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования установлено, что ответная реакция *B. pubescens* ssp. *czerepanovii* на техногенный стресс проявилась в увеличении содержания фенольных соединений, в большей мере – для катехинов, и общего содержания ФС на 40–70 % по сравнению с фоном. Содержание флавонолов, фенолокислот и танинов в листьях берез под техногенным воздействием возросло в 1,2–1,3 раза по сравнению с фоном. Отмечена высокая связь между накоплением фенольных соединений и расстоянием от источника загрязнения ($0,69 \leq R^2 \leq 0,94$).

Отмечена изменчивость в содержании фенольных соединений на разных расстояниях от промышленного комплекса, что может трактоваться как нарушение фенольного метаболизма растений.

Выявлено, что по мере удаления от источника загрязнения содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллы a и b , каротиноиды) в листьях *B. pubescens* ssp. *czerepanovii* увеличивалось в 1,5–1,9 раза. Величина отношения сумма хлорофиллов/каротиноиды, как правило, возрастала от импактных участков к фоновым, хлорофилл a/b – снижалась.

Более высокой антирадикальной активностью ($IC_{50} = 0,07–0,08$ мг/мл) обладали водно-этанольные экстракты листьев берез, произрастающих вблизи предприятия на расстоянии до 14 км, что, возможно, связано с повышенным содержанием катехинов.

Таким образом, при тщательно подобранном контроле изменения в концентрациях ФС (в сумме и по группам), фотосинтетических пигментов, а также антирадикальной активности экстрактов из листьев *B. czerepanovii* возможно использовать для мониторинга

и диагностики состояния окружающей среды.

Благодарности

Использовано оборудование Центрального сибирского ботанического сада Сибирского отделения Российской академии наук.

Вклад авторов

Е. П. Храмова руководила исследованиями, написала рукопись и обеспечила ее критическое прочтение; И. Е. Лобанова провела анализ катехинов, подготовила таблицы, обеспечила критическое прочтение рукописи; Т. М. Шалдаева провела DPPH-анализ и спектрофотометрические анализы, выполнила статистический анализ; Е. Г. Зибзеев собрал растительные образцы, подготовил иллюстрации, обеспечил критическое прочтение рукописи. Все авторы обсудили результаты и прокомментировали рукопись.

Финансирование

Исследования проводились в рамках “Большой научной экспедиции” – большого проекта по изучению биологического разнообразия, инициированного компанией “Норильский никель”. Химический анализ проведен на оборудовании Центрального сибирского ботанического сада Сибирского отделения Российской академии наук (темы государственного задания: ЦСБС СО РАН АААА-А21-121011290025-2 и АААА-А21-121011290026-9).

Соблюдение этических стандартов

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

Конфликт интересов

Авторы данной статьи заявляют, что у них нет конфликта интереса.

ЛИТЕРАТУРА

Биохимические методы в физиологии растений: сб. ст. / под ред. О. А. Павлинова. М.: Наука, 1971. 226 с.

Василевская Н. В. Поливариантность репродуктивного развития *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii* Orlova в условиях техногенного стресса // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26, № 3. С. 100–111. doi: 10.31242/2618-9712-2021-26-3-100-111

Государственная фармакопея Российской Федерации. Изд. XIV. Т. IV. М., 2018. С. 6081–6083.

Загоскина Н. В., Назаренко Л. В. Активные формы кислорода и антиоксидантная система растений // Вестн. МГПУ. Серия: Естественные науки. 2016. № 2 (22). С. 9–23.

Запрометов М. Н. Фенольные соединения: Распространение, метаболизм и функции в растениях. М.: Наука, 1993. 272 с.

Зубова М. Ю., Николаева Т. Н., Нечаева Т. Л., Малюкова Л. С., Загоскина Н. В. О содержании пигментов,

фенольных соединений и антирадикальной активности молодых побегов чая (*Camellia sinensis* L.) // Химия раст. сырья. 2019. № 4. С. 249–257. <https://doi.org/10.14258/jcprgm.2019046065>

Кривенцов В. И. Методические рекомендации по анализу плодов на биохимический состав. Ялта, 1982. 21 с.

Кукушкина Т. А., Костикова В. А., Храмова Е. П. Содержание катехинов в листьях и корнях *Comarum salesovianum* и *Comarum palustre* (Rosaceae) // Химия раст. сырья. 2024. № 2. С. 196–206. <https://doi.org/10.14258/jcprgm.20240212561>

Мамаев С. А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений. М.: Наука, 1972. 284 с.

Маслова Т. Г., Марковская Е. Ф., Слемнев Н. Н. Функции каротиноидов в листьях высших растений (обзор) // Журн. общ. биологии. 2020. Т. 81, № 4. С. 297–310. <https://doi.org/10.31857/S0044459620040065>

Меньщикова Е. Б., Ланкин В. З., Зенков Н. К., Бондарь И. А., Круговых Н. Ф., Труфакин В. А. Окислительный стресс. Проксиданты и антиоксиданты. М.: Изд. Фирма “Слово”, 2006. 556 с.

Мерзляк М. Н. Активированный кислород и жизнедеятельность растений // Соросовский образоват. журн. 1999. № 9. С. 20–26.

Методы биохимического исследования растений / под ред. А. И. Ермакова. Л.: Агропромиздат. Ленингр. отделение, 1987. 430 с.

Обзор метеорологических условий Кольского полуострова <https://kolgimet.ru/obzor-meteorologicheskikh-uslovii-za-ijun>, обращение 05.08.2024

Тараховский Ю. С., Ким Ю. А., Абдрашилов Б. С., Музафаров Е. Н. Флавоноиды: биохимия, биофизика, медицина. Пушино: Synchrobook, 2013. 310 с.

Устойчивость растений к химическому загрязнению / Перм. гос. ун-т.; под ред. Р. В. Кайгородова. Пермь: Изд-во Перм. гос. ун-та, 2010. 151 с.

Федосеева Л. М. Изучение дубильных веществ подземных и надземных вегетативных органов бадана толстолистного (*Bergenia Crassifolia* (L.) Fitsh, произрастающего на Алтае // Химия раст. сырья. 2005. № 2. С. 45–50.

Чупахина Г. Н., Масленников П. В., Скрыпник Л. Н., Бессережнова М. И. Реакция пигментной и антиоксидантной систем растений на загрязнение окружающей среды г. Калининграда выбросами автотранспорта // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2012. № 2 (18). С. 171–185. <https://doi.org/10.17223/1998859111811>

Шавнин С. А., Колтунов Е. В., Яковлева М. И. Влияние техногенного загрязнения на содержание фенольных соединений в листьях березы повислой (*Betula pendula* ROTH.) в условиях урбанизации // Соврем. пробл. науки и образования. 2014. № 2. С. 520–520.

Afanasyeva L., Kashin V. The Chemical Composition and Productivity of *Vaccinium myrtillus* L. under Influence of Industrial Pollution // Journal of Siberian Federal University. Biology. 2015. Vol. 8. P. 333–346. doi: 10.17516/1997-1389-2015-8-3-333-346

Ardestani A., Yazdanparast R. Antioxidant and free radical scavenging potential of *Achillea santolina* extracts // Food Chem. 2007. Vol. 104, Iss. 1. P. 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.10.066>

Banjarnahor S., Artanti N. Antioxidant properties of flavonoids // Med. J. Indonesia. 2014. Vol. 23, N 4. P. 239–241. <http://dx.doi.org/10.13181/mji.v23i4.1015>

- Bialonska D., Zobel A., Kuraś M., Tykarska T., Sawicka-Kapusta Katarzyna. Phenolic Compounds and Cell Structure in Bilberry Leaves Affected by Emissions from a Zn–Pb Smelter // *Water Air Soil Poll.* 2007. Vol. 181. P. 123–133. <https://doi.org/10.1007/s11270-006-9284-x>
- Foti M. C., Amorati R. ROS and phenolic compounds // *Reactive Oxygen Species in Biology and Human Health*. 2016. P. 49–65.
- Gawron-Gzella A., Witkowska-Banaszczak E., Bylka W., Dudek-Makuch M., Odwrot A., Skrodzka N. Chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities of *Sanguisorba officinalis* L. extracts // *Pharm. Chem.* 2016. Vol. 50 (4). P. 244–249. doi: 10.1007/s11094-016-1431-0
- Kozlov M. V., Zvereva E. L. Reproduction of mountain birch along a strong pollution gradient near Monchegorsk, Northwestern Russia // *Environ. Pollut.* 2004. Vol. 132, N 3. P. 443–451. doi: 10.1016/j.envpol.2004.05.018
- Kumarasamy Y., Byres M., Cox P. J., Jaspars M., Nahar L., Sarker S. D. Screening seeds of some Scottish plants for free radical scavenging activity // *Phytother. Res.* 2007. Vol. 21, N 7. P. 615–621. <https://doi.org/10.1002/ptr.2129>
- Loponen J., Lempa K., Ossipov V., Kozlov M. V., Girs A., Hangasmaa K., Haukioja E., Pihlaja K. Patterns in content of phenolic compounds in leaves of mountain birches along a strong pollution gradient // *Chemosphere*. 2001. Vol. 45. P. 291–301.
- Loponen J., Ossipov V., Koricheva J., Haukioja E., Pihlaja K. Low molecular mass phenolics in foliage of *Betula pubescens* Ehrh. in relation to aerial pollution // *Chemosphere*. 1997. Vol. 34, N 4. P. 687–697.
- Loponen J., Ossipov V., Lempa K., Haukioja E., Pihlaja K. Concentrations and among-compound correlations of individual phenolics in white birch leaves under air pollution stress // *Chemosphere*. 1998. Vol. 37, N 8. P. 1445–1456.
- Okawa M., Kinjo J., Nohara T., Ono M. DPPH (1,1-Diphenyl-2-Picrylhydrazyl) Radical Scavenging Activity of Flavonoids Obtained from Some Medicinal Plants // *Biol. Pharm. Bull.* 2001. Vol. 24, N 10. P. 1202–1205.
- Pietta P.-G. Flavonoids as Antioxidants // *J. Nat. Prod.* 2000. Vol. 63. P. 1035–1042.
- Polish Pharmacopoeia VI. Polish Pharmaceutical Society; Warszawa, The Netherlands, 2002. P. 150.
- Su X., Duan J., Jiang Y., Duan X., Chen F. Polyphenolic Profile and Antioxidant Activities of Oolong Tea Infusion under Various Steeping Conditions // *Int. J. Mol. Sci.* 2007. Vol. 8. P. 1196–1205.
- Uka U. N., Belford E. J. D., Elebe F. A. Effects of road traffic on photosynthetic pigments and heavy metal accumulation in tree species of Kumasi Metropolis, Ghana // *SN Appl. Sci.* 2021. Vol. 3, N 131. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04027-9>
- Vinogradova N., Vinogradova E., Chaplygin V., Mandzhieva S., Kumar P., Rajput V. D., Minkina T., Seth C. S., Burachevskaya M., Lysenko D. et al. Phenolic Compounds of the Medicinal Plants in an Anthropogenically Transformed Environment // *Molecules*. 2023. Vol. 28. Iss. 17. P. 6322. <https://doi.org/10.3390/molecules28176322>

Influence of anthropogenic stress for content of biologically active compounds in leaves *Betula czerepanovii* from Kola Peninsula

E. P. KHRAMOVA, I. E. LOBANOVA, T. M. SHALDAEVA, E. G. ZIBZEEV

*Central Siberian Botanical Garden of SB RAS
101, Zolotodolinskaya st., Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: elenakhramova2023@yandex.ru, egzibzeev@yandex.ru*

Biologically active compounds in ethanol extracts of the leaves of *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii* were studied in the zone of influence of Nor Nickel enterprises (Kola Division). The total content of phenolic compounds, flavonoids, tannins, phenolic acids, and photosynthetic pigments (chlorophyll and carotenoid) was determined by spectrophotometry and anti-radical activity was evaluated. The phenolic compound content has increased under anthropogenic stress, indicating that these compounds can be used for monitoring and diagnosing environmental conditions. The plant response to stress was more pronounced for catechins and the total content of phenolic compounds, whose concentration in the zone of maximum exposure increased by 1.4–1.7 times compared with the background. The content of photosynthetic pigments (chlorophyll, carotenoid) in birch leaves decreased by 1.5–1.9 times as they approached the source of contamination. Water-ethanol extracts of birch leaves from polygons in proximity to the industrial facilities of the enterprise had a higher anti-radical activity ($IC_{50} = 0.07$ mg/ml), which may be related to increased catechins content. It was found that the variability of BAS content in the leaves of *B. pubescens* ssp. *czerepanovii* decreased in a gradient of anthropogenic pollution.

Key words: air pollution, *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*, phenolic compounds, photosynthetic pigments, anti-radical activity.