УДК [504.43+504.73].054:547.912

ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИЕ АРОМАТИЧЕСКИЕ УГЛЕВОДОРОДЫ В КУСТАРНИКАХ *BETULA NANA* (BETULACEAE, MAGNOLIÓPSIDA) ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Е. В. Яковлева, Д. Н. Габов

Институт биологии Коми научного центра УрО РАН
Россия, 167982, Республика Коми, Сыктывкар, Коммунистическая, 28
E-mail: kaleeva@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 23.03.2018 г., после доработки 27.09.2018 г., принята 12.10.2018 г.

Яковлева Е. В., Габов Д. Н. Полициклические ароматические углеводороды в кустарниках *Betula nana* (Betulaceae, Magnoliópsida) под воздействием теплоэлектростанции // Поволжский экологический журнал. 2018. № 4. С. 495 – 512. DOI: https://doi.org/10.18500/1684-7318-2018-4-495-512

Проведены исследования содержания полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в *Betula nana* L. и органогенных горизонтах почв на фоновом участке и в зоне действия теплоэлектростанции (ТЭС) на расстоянии 0.5, 1.0 и 1.5 км от источника. Распределение ПАУ по вегетативным органам березки неравномерно. Качественный состав ПАУ разных органов кустарника сходен. Не выявлено значимых изменений содержания полиаренов в разных органах берёзки и на их поверхности по мере удаления от ТЭС. Содержание полиаренов в органах растений под действием ТЭС превышало фоновые значения в 2–3 раза, максимальные превышения характерны для листьев. Поверхностное содержание полиаренов на коре и корнях в условиях загрязнения возрастало до 3 раз. Для листьев и ветвей превышения не выявлено. Превышение фоновых значений для почв в зоне антропогенного воздействия составило 3 – 3.5 раза с максимумом накопления в 1 км. Содержание полиаренов в почвах было в 3 раза выше, чем в берёзке на фоновом участке, в 5–6 раз на загрязненном. Выявлена тесная корреляция между содержанием ПАУ в *B. nana* и почвах. Для листьев и ветвей *B. nana* выявлено снижение доли поверхностного накопления в общем содержании ПАУ в условиях загрязнения по сравнению с фоновым участком. Для коры и корней обнаружена обратная тенденция. Кластерный анализ показал четкое разделение поверхностного и общего содержания полиаренов во всех исследованных органах. Факторный анализ общего содержания ПАУ в органах березки позволил выявить 3 основных фактора распределения ПАУ, отдельно выделялись наиболее легкие структуры, токсичные компоненты и остальные полиарены. Органы карликовой берёзки могут быть использованы для индикации уровня загрязнения тундровых фитоценозов. Для анализа краткосрочных изменений содержания ПАУ рекомендуется использовать общее содержание ПАУ в листьях, для оценки долгосрочного воздействия – в коре *B. nana*.

Ключевые слова: *Betula nana*, полициклические ароматические углеводороды, органы, почва, поверхностное накопление, биоаккумуляция, индикация.

DOI: https://doi.org/10.18500/1684-7318-2018-4-495-512

ВВЕДЕНИЕ

Активное развитие промышленности во всем мире ведет к интенсификации процессов загрязнения окружающей среды различными поллютантами, в том чис-

© Яковлева Е. В., Габов Д. Н., 2018

ле полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ). По данным литературы, основными источниками поступления ПАУ в окружающую среду являются процессы, связанные со сжиганием угля (Сушкова и др., 2017; Ribeiro et al., 2014). В настоящее время все больше внимания уделяется оценке состояния Арктических регионов. В тундровой зоне Республики Коми широко распространены как добыча каменного угля, так и его использование в качестве топлива, что ведет к негативному влиянию на почвенный и растительный покров и на здоровье населения. ПАУ характеризуются канцерогенным, мутагенным и токсичным действием на живые организмы (Яковлева и др., 2011, 2016; Li et al., 2012; Hamid et al., 2017). Исследования китайских ученых показали повышение концентрации метаболитов ПАУ в моче детей школьного возраста, подвергавшихся воздействию выбросов теплоэлектростанции (ТЭС) (Liu et al, 2017).

Состав ПАУ сажевых частиц, образующихся при сжигании угля, во многом зависит от свойств и состава самого топлива и температуры его сгорания (Sahu et al., 2009; Ribeiro et al., 2014; Li et al., 2014).Так, исследования угольной золы, образовавшейся при работе ТЭС, расположенной вблизи от Порто (северо-запад Португалии), показали отсутствие в ней таких 2-, 3-ядерных ПАУ, как нафталин, аценафтен и флуорен и преобладание других 3-, 4-ядерных ПАУ. Авторы связывали данный факт с высокой температурой сжигания угля, при которой легкие полиарены улетучивались, не сорбируясь на частицах сажи (Ribeiro et al., 2014).

Исследования, направленные на изучение золы с ТЭЦ, работающей на каменном угле, позволили выявить изменения состава полиаренов в зависимости от размера частиц. Было установлено, что содержание 2-, 3-, 4-ядерных ПАУ уменьшается с увеличением размера частиц сажи, для тяжелых полиаренов выявлена обратная тенденция. Авторами установлено, что массовая доля 3-, 4-ядерных структур составляла до 80% от общей суммы ПАУ в угольной золе (Li et al., 2014). Индийскими учеными в золе с ТЭЦ были выявлены значительные содержания 2-, 3-, 4-ядерных структур полиаренов (Sahu et al., 2009).

Другие индийские исследователи показали, что общее содержание ПАУ было на 2 порядка выше в угле, чем в летучей золе и зольной пыли. Тяжелые ПАУ преобладали в угле и летучей золе, легкие ПАУ в зольной пыли (Verma et al., 2015).

При наличии ряда работ по изучению состава ПАУ золы, образующейся при сжигании угля, дальнейшей аккумуляции и миграции полиаренов уделялось мало внимания. Изучено влияние одной из крупнейших в России теплоэлектростанций – Новочеркасской ГРЭС (государственной районной электростанции), работающей на угле и природном газе, на накопление ПАУ в почве. Авторами установлено, что загрязнению бенз[а]пиреном наиболее подвержена пятикилометровая зона на северо-запад от электростанции, совпадающая с линией преобладающего направления ветров, с максимумом накопления на расстоянии около 1.6 км от источника (Сушкова и др., 2017).

Для оценки полиаренового загрязнения используются не только почвы. В промышленном районе Алиага Измир (Турция) в апреле – мае 2014 г. были исследованы образцы пчел, хвои сосны и прополиса с целью биоиндикации полиаренового загрязнения. В районе был сконцентрирован ряд промышленных производств: нефтехимическая промышленность, металлургические заводы, газовые

турбины и электростанция, работающая на природном газе (Kargar et al., 2017). Медоносные пчелы продемонстрировали лучшие возможности мониторинга в отношении взвешенных ПАУ, тогда как хвоя сосны была признана лучшим биоиндикаторам следовых концентраций ПАУ.

Наши исследования посвящены накоплению полиаренов в тундровых фитоценозах. Верхний ярус южной тундры представлен в основном кустарниковой растительностью, включающей в себя *Betula nana* Linnaeus, 1749 (карликовая берёза) и разные виды ив. Несмотря на это особенности, накопления различных загрязнителей в кустарниковых видах малочисленны. Среди растений южной кустарниковой тундры *B. nana* является наиболее распространенным видом, его вклад в биомассу данных фитоценозов составляет 33 – 35%. По нашим данным, вклад *B. nana* в вынос ПАУ в экосистемах кустарничковой тундры составляет 10% для фоновых участков и до 16% на загрязненных (Yakovleva et al., 2017). Это делает *B. nana* интересным объектом для исследования. Так, М. П. Тентюковым (2008) были исследованы характеристики накопления тяжелых металлов в тундровых кустарниках *B. nana* и *Salix glauca* в условиях аэротехногенного загрязнения п-ва Ямал. Авторы изучали лишь побеги текущего года и выявили, что кустарники отличаются невысокими коэффициентами биологического накопления тяжёлых металлов. Часто исследования содержания минерального состава кустарников носят прикладной характер, так, иностранные исследователи изучали состав *B. nana* как кормового продукта северных оленей (Ophof et al., 2013). Российскими исследователями было предложено использовать вид *B. nana* в качестве индикатора для оценки содержания тяжелых металлов в кормах северных оленей (Зубарева, 2016). Этими же авторами на основании многолетних исследований установлено, что растения данного вида могут быть хорошими индикаторами загрязнения атмосферы диоксидом серы (Зубарева, Данилова, 2017). На основании исследования воздействия газового месторождения Ямбург ООО «Газпром» на тундровые экосистемы, так же было рекомендовано использовать листья *B. nana* для индикации атмосферного загрязнения в условиях газодобывающей промышленности (Bashkin et al., 2017). Канадские учёные с 2001 по 2010 г. осуществляли мониториговые исследования содержания полихлорированных бифенилов (ПХБ) в карликовой берёзе в Арктической зоне. Исследования проводили для побегов текущего года. При загрязнении авторами были отмечены резкие повышения уровня содержания ПХБ в берёзке до 14 раз. Через 3 года после рекультивации концентрации загрязнителей снижались до базового уровня (Luttmer et al., 2013).

Тундровые экосистемы наряду с высоким ресурсным потенциалом характеризуются низкой устойчивостью к антропогенным воздействиям. В первую очередь техногенному воздействию подвергается растительный покров и органогенный горизонт почвы, поэтому изучение накопления ПАУ растениями и почвами в зонах действия ТЭС, их распределения по органам растений и способности распространяться на дальние расстояния представляет наибольший интерес.

Цель данной работы – исследовать особенности накопления полиаренов в растениях верхнего яруса и почвах южной тундры под воздействием процессов сжигания угля.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Проведены исследования содержания ПАУ в органогенных горизонтах тундровых поверхностно глеевых почв и кустарнике *Betula nana* L. (карликовая берёза). Работы проводили в южной тундре в Воркутинском районе Республики Коми. Общая характеристика района исследования опубликована в работе Р. С. Василевича с соавторами (2014). Почвы и растения отбирали на фоновом участке в 6 км от ст. Хановей (30 км от г. Воркута) и в районе действия ТЭС на расстоянии 0.5, 1.0 и 1.5 км от источника эмиссии в северо-восточном направлении. Отбор проб проводили с учетом розы ветров.

Для отбора проб на каждом участке были заложены 3 пробных площадки (Родин и др., 1968). На каждой площадке проводили отбор проб почв органогенного горизонта и кустарника. Размер площадок 1×1 м. Кустарнички разделяли на листья, ветви, кору, корни и стебли. Образцы почв и растений высушивали при комнатной температуре, измельчали и проводили химический анализ на содержание полиаренов. Для определения поверхностного накопления ПАУ растениями использовали нерастертые образцы.

Химико-аналитические исследования почв и растений выполняли в ЦКП «Хроматография» Института биологии Коми НЦ УрО РАН. При подготовке проб растений к химическому анализу поверхностного загрязнения использовали оригинальную методику, описанную А. Г. Горшковым с соавторами (2008). Для полного извлечения ПАУ из почв и растений использовали систему ускоренной экстракции растворителями ASE-350 (Dionex Corporation, США). Пробу массой 1 г помещали в экстракционную ячейку и трижды экстрагировали смесью хлористый метилен:ацетон (1:1) при температуре 100ºС. Затем экстракты концентрировали с применением аппарата Кудерна – Даниша при температуре в термостате 70ºС и заменяли растворитель на гексан. Полученный концентрат пробы объёмом 3 см^3 очищали от неорганических примесей методом колоночной хроматографии с использованием оксида алюминия II степени активности по Брокману. В качестве элюэнта использовали 50 см^3 смеси гексан:хлористый метилен (4:1). Элюат концентрировали с применением аппарата Кудерна – Даниша при температуре в термостате 85ºС до объема 5 см^3, затем добавляли 3 см^3 ацетонитрила и упаривали при температуре 90ºС до полного удалёния гексана. Концентрат пробы в ацетонитриле анализировали на содержание ПАУ методом ВЭЖХ. Контроль точности результатов измерений проводили с использованием стандартного образца Certified reference material BCR-683 (European commission community bureau of reference) для растений и Standard Reference Material 1944 «New York/New Jersey Waterway Sediment» (National Institute of Standards & Technology, USA) для почв.

Для исследованных выборок с помощью теста Колмогорова – Смирнова установлено нормальное распределение. Статистическую обработку для оценки достоверности расхождений средних данных проводили при помощи *t*-критерия Стьюдента, $P = 0.95$. Для проведения кластерного и факторного анализа использовали программу Statistica-6. При построении дендрограммы сходства для объединения данных применяли метод Варда, в качестве способа определения сходства использовали Евклидово расстояние.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования накопления полиаренов в органах карликовой берёзки на фоновом участке позволили выявить присутствие 12 структур ПАУ: нафталина, аценафтена, флуорена, фенантрена, антрацена, флуорантена, пирена, бенз[a]антрацена, хризена, бенз[к]флуорантена, бенз[a]пирена и бенз[ghi]перилена (табл. 1). Тяжелые полиарены были найдены лишь в коре и корнях берёзки, где их доля от общего содержания ПАУ не превышала 2%. В условиях загрязнения ТЭС в органах кустарничка кроме перечисленных ПАУ появляются тяжелые структуры бенз[b]флуорантен и дибенз[a,h]антрацен. Вклад тяжелых ПАУ в общее содержание полиаренов в разных органах возрастает до 10%. Появление тяжелых структур полиаренов было связано с деятельностью ТЭС.

Для фонового участка характерно равномерное распределение ПАУ по органам растений с незначимым снижением общего содержания ПАУ в корнях и стеблях берёзки. В условиях загрязнения выявлено снижение содержания ПАУ в ветвях и в большей степени в стеблях берёзки по сравнению с другими органами. На расстоянии в 0.5 км от ТЭС максимальным загрязнением отличались листья кустарника, в 1 и 1.5 км листья и кора берёзки. Распределение ПАУ по органам берёзки на фоновом участке можно представить в виде уравнения: *корни* > *кора* > *листья* > > *ветви* > *стебли*, на загрязненных – *листья* > *кора* > *ветви* ≥ *корни* ≥ *стебли*.

Качественный состав ПАУ разных органов кустарника сходен между собой. Коэффициенты корреляции между составом ПАУ различных органов для фонового участка были довольно близки и составили $r = 0.93 – 0.99$ ($n = 3$). На загрязненных участках значения коэффициента корреляции составили $r = 0.80 – 0.99$ ($n = 3$), наиболее низкие коэффициенты корреляции были выявлены между составом ПАУ стеблей и всех других органов берёзки. Такой факт во многом объясним тем, что в присутствии загрязнения стебли в меньшей степени способны к накоплению загрязнителей, так как поступление ПАУ через кору затруднено.

Значимых изменений содержания полиаренов в разных органах берёзки с расстоянием от ТЭС нами не выявлено. Незначительное превышение содержания ПАУ в листьях выявлено на расстоянии 0.5 км. Для ветвей и корней установлены тренды повышения содержания ПАУ по мере удаления от ТЭС. Данная тенденция во многом обусловлена листопадностью берёзки. Содержание ПАУ в листьях определяло их накопление за один вегетационный период, тогда как в корнях и ветвях – за несколько лет. В течение нескольких лет могла изменяться как интенсивность воздействия предприятия, так и направление ветра, и дальность распространения загрязнителей, это и определяло особенности в накоплении ПАУ разными вегетативными органами.

Содержание полиаренов в органах растений под действием ТЭС значительно увеличивалось по сравнению с фоновым участком. Кратности превышения были максимальны для листьев и составляли 2-3 раза, возрастая по мере приближения к ТЭС. Для других вегетативных органов в условиях загрязнения содержание ПАУ повышалось в 2 раза. Четко прослеживается тренд перехода от корневого поступления ПАУ в растения на фоновом участке к преимущественно фолиарному – у растений на загрязненных.

Таблица 1

Содержание ПАУ в органах *Betula nana* на разном расстоянии от ТЭС, нг/г

ПАУ	Фон					Расстояние от ТЭС														
						0.5 км					1 км					1.5 км				
	Листья	Ветви	Кора	Корни	Стебли	Листья	Ветви	Кора	Корни	Стебли	Листья	Ветви	Кора	Корни	Стебли	Листья	Ветви	Кора	Корни	Стебли
Нафталин	22.4 / 2.2	17.4 / 3.3	23.6 / 3.3	36.8 / 0.1	26.9 / 1.3	70.4 / 12.3	39.4 / 4.2	70.6 / 12.2	51.6 / 3.2	95.4 / 12.8	55.9 / 6.0	50.8 / 5.5	72.2 / 11.1	51.2 / 6.9	63.9 / 16.9	60.3 / 11.1	50.4 / 5.0	74.7 / 5.3	67.0 / 5.6	72.9 / 22.5
Аценафтен	2.2 / 0.7	0.7 / 0.9	3.2 / 3.3	3.7 / 0.2	1.0 / 0.3	0.8 / 0.5	1.5 / 0.3	0.6 / 0.8	0.4 / 0.5	0.0 / 0.0	0.2 / 0.3	0.0 / 0.0	0.7 / 0.9	1.7 / 2.1	0.0 / 0.0	0.8 / 1.0	0.2 / 0.3	0.0 / 0.0	0.9 / 0.6	2.3 / 2.8
Флуорен	7.1 / 2.9	6.6 / 0.7	8.2 / 4.3	8.6 / 2.2	4.8 / 0.2	12.7 / 0.8	8.0 / 1.6	11.4 / 1.0	7.3 / 1.3	7.5 / 0.2	10.9 / 1.8	7.8 / 0.8	11.1 / 1.4	7.5 / 1.0	7.2 / 2.2	11.1 / 0.7	8.3 / 0.3	12.2 / 2.1	9.4 / 0.3	6.3 / 2.2
Фенантрен	29.8 / 16.9	26.8 / 0.8	33.9 / 10.3	29.1 / 2.3	21.4 / 2.4	76.4 / 10.6	39.6 / 9.0	63.3 / 0.1	43.0 / 10.	25.7 / 0.0	71.6 / 9.5	50.1 / 5.9	67.6 / 11.2	45.9 / 0.7	31.3 / 11.1	59.1 / 5.4	46.0 / 4.7	55.9 / 12.2	53.2 / 8.6	23.2 / 5.5
Антрацен	1.2 / 0.8	0.9 / 0.0	1.1 / 0.3	1.0 / 0.0	0.8 / 0.1	4.0 / 0.1	1.9 / 0.5	2.5 / 0.5	1.5 / 0.2	1.3 / 0.3	2.3 / 0.3	1.7 / 0.1	1.8 / 0.2	1.5 / 0.1	0.9 / 0.4	2.9 / 0.9	1.5 / 0.1	2.3 / 0.3	2.3 / 0.4	1.0 / 0.1
Флуорантен	5.4 / 3.9	4.5 / 1.0	6.6 / 3.7	2.4 / 0.1	3.3 / 1.4	23.6 / 3.1	9.2 / 0.5	13.0 / 0.1	11.0 / 3.3	5.3 / 0.4	19.1 / 2.5	13.0 / 1.5	12.2 / 1.5	11.4 / 1.1	6.5 / 2.6	18.7 / 4.7	13.2 / 0.9	15.0 / 2.5	13.4 / 4.7	5.8 / 1.0
Пирен	8.6 / 5.5	5.7 / 0.4	3.4 / 1.1	5.7 / 1.6	2.4 / 0.9	18.0 / 4.5	9.5 / 0.9	11.2 / 2.4	10.3 / 1.0	4.4 / 0.7	16.3 / 2.3	12.5 / 1.9	8.5 / 5.2	12.6 / 1.4	4.1 / 2.1	15.5 / 4.6	10.9 / 1.7	12.0 / 1.7	9.4 / 4.2	8.5 / 6.5
Бенз[а]антрацен	0.0 / 0.0	0.5 / 0.3	0.6 / 0.3	0.5 / 0.7	0.4 / 0.6	2.3 / 0.5	0.9 / 0.1	1.4 / 0.6	1.0 / 0.2	0.4 / 0.1	2.2 / 0.3	1.0 / 0.1	0.8 / 0.2	1.2 / 0.5	0.5 / 0.5	1.6 / 0.5	1.1 / 0.2	0.8 / 0.1	0.6 / 0.4	2.2 / 1.1
Хризен	1.0 / 1.4	2.5 / 2.8	1.2 / 0.8	1.2 / 0.2	0.5 / 0.8	7.1 / 1.1	2.0 / 0.8	4.1 / 1.4	6.4 / 5.1	1.5 / 0.5	5.7 / 0.0	3.2 / 0.4	2.8 / 0.4	3.3 / 0.6	1.5 / 0.8	4.8 / 1.0	3.2 / 0.4	3.1 / 0.9	3.2 / 0.9	1.7 / 0.3
Бенз[b]флуорантен	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	3.0 / 1.3	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	3.4 / 4.2	0.0 / 0.0	7.2 / 7.0	1.3 / 1.6	0.0 / 0.0	1.1 / 1.4	2.0 / 1.4	2.0 / 1.4	3.8 / 4.6	0.7 / 0.9	2.7 / 2.4	1.6 / 1.0
Бенз[к]флуорантен	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.1 / 0.1	0.2 / 0.3	0.0 / 0.0	0.8 / 0.1	0.0 / 0.0	0.4 / 0.3	0.3 / 0.2	0.1 / 0.1	0.6 / 0.2	0.5 / 0.2	0.3 / 0.1	0.4 / 0.2	0.4 / 0.3	0.6 / 0.1	0.3 / 0.0	0.2 / 0.1	0.5 / 0.1	0.6 / 0.4
Бенз[а]пирен	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.2 / 0.3	0.3 / 0.5	0.0 / 0.0	0.9 / 0.3	0.0 / 0.0	0.2 / 0.3	2.5 / 2.5	0.2 / 0.1	1.0 / 0.6	0.2 / 0.2	0.1 / 0.2	0.6 / 0.4	0.5 / 0.3	1.2 / 0.6	0.0 / 0.0	0.2 / 0.2	0.9 / 0.8	1.2 / 0.7
Дибенз[a,h]антрацен	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.6 / 0.4	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.3 / 0.4	0.0 / 0.0	0.3 / 0.3	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.4 / 0.5	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.5 / 0.7
Бенз[ghi]перилен	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	1.2 / 1.8	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	7.8 / 9.6	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	2.5 / 3.0	0.0 / 0.0	2.5 / 3.1	0.0 / 0.0	1.2 / 1.5	0.0 / 0.0	3.2 / 3.9
∑ ПАУ	77.8 / 32.9	65.5 / 6.6	83.3 / 22.5	89.7 / 1.3	61.5 / 8.0	220.5 / 32.2	112.0 / 17.3	178.6 / 12.1	146.9 / 56.3	141.8 / 11.4	193.3 / 13.1	142.2 / 10.9	178.1 / 23.3	140.8 / 8.2	119.1 / 36.3	181.2 / 22.8	138.9 / 9.7	178.2 / 7.3	163.4 / 13.4	131.1 / 31.7

Примечание. В числителе – среднее значение, в знаменателе – стандартное отклонение среднего.

Анализ содержания полиаренов на поверхности листьев, ветвей, коры и корней берёзки позволил выявить 7 легких структур ПАУ: нафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен и хризен (табл. 2). На поверхности растений загрязненного участка обнаружены 11 ПАУ, включая перечисленные и также аценафтен, бенз[а]антрацен, бенз[к]флуорантен и бенз[а]пирен. Полученные данные варьировали в довольно большом диапазоне, что характерно для поверхностного накопления, ввиду неравномерности оседания ПАУ на поверхности

Следует отметить, что максимальное поверхностное накопление, как на фоновом, так и на загрязненных участках, было характерно для листьев берёзки. Содержание ПАУ на поверхности органов почти не изменялось с расстоянием от ТЭС. Поверхностное содержание полиаренов на коре и корнях в условиях загрязнения возрастало до 3 раз по сравнению с фоновым участком. Для листьев и ветвей не было обнаружено превышения фоновых значений поверхностного накопления ПАУ.

Распределение ПАУ на поверхности органов берёзки для фонового участка можно представить в виде уравнения *листья* > *ветви* > *кора* > *корни*, для загрязненных – *листья* > *кора* > *ветви* ≥ *корни*.

Исследование содержания полиаренов на поверхности органов позволило выявить, что на фоновом участке 58% ПАУ сконцентрированы на поверхности листьев, в условиях загрязнения доля поверхностного накопления снижалась до 18% вблизи ТЭС и вновь несколько возрастала до 27 – 28% с удалением от источника (рис. 1). Под действием аэротехногенных выбросов предприятия, оседавших на поверхности листовых пластин, способность к накоплению полиаренов у листьев берёзки активизировалась. Абсолютное содержание полиаренов на поверхности листьев незначимо снижалось на расстоянии в 0.5 км по сравнению с большим удалением, при этом общее содержание ПАУ в берёзке в 0.5 км было выше в сравнении с более отдаленными площадками. ПАУ, попавшие на поверхность листьев, активно транспортировались внутрь растения. По мере удаления от источника поступление полиаренов на поверхность снижалось, что привело к снижению интенсивности накопления, а следовательно, росту содержания ПАУ на поверхности наряду со снижением общего содержания полиаренов в листьях.

Сходная тенденция была выявлена для ветвей берёзки, вклад поверхностного накопления в общее содержание ПАУ в ветвях снижался от 29% на фоновом участке до 20 – 21% на загрязненных и практически не зависел от расстояния, так как ветви характеризуются меньшей площадью поверхности по сравнению с листьями, а также меньшим количеством и размером устьиц, что препятствует активной сорбции ПАУ и меньшей чувствительности при аэротехногенном поступлении ПАУ.

Обратная закономерность выявлена для коры и корней берёзки. Доля поверхностного содержания ПАУ в корневой части берёзки и коре на фоновом участке была ниже, чем на загрязненных, и составляла 15 и 10% соответственно. Данная тенденция может быть связана с тем, что ПАУ в естественных условиях способны синтезироваться в процессе метаболизма данными органами кустарника и не выделяются на поверхность. В условиях загрязнения повышение уровня поступления

Таблица 2

Содержание ПАУ в на поверхности органов *Betula nana* на разном расстоянии от ТЭС, нг/г

ПАУ	Фон				Расстояние от ТЭС											
					0.5 км				1 км				1.5 км			
	Листья	Ветви	Кора	Корни	Листья	Ветви	Кора	Корни	Листья	Ветви	Кора	Корни	Листья	Ветви	Кора	Корни
Нафталин	25.2	0.0	0.0	0.0	7.3	2.9	7.1	6.6	14.4	1.7	5.5	0.0	9.6	3.7	6.3	6.8
	17.4	0.0	0.0	0.0	9.0	3.6	4.4	4.2	2.5	2.0	6.7	0.0	6.0	4.5	4.1	1.4
Аценафтен	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.2	0.0	0.4	0.0	0.7	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.5	0.0	0.8	0.0
Флуорен	2.8	2.3	1.6	1.7	2.8	1.6	2.8	1.0	2.1	2.5	2.5	0.6	2.9	1.1	2.2	1.7
	0.5	0.5	0.1	1.0	0.3	0.1	0.5	0.3	0.4	0.2	0.6	0.4	0.5	0.8	0.2	0.7
Фенантрен	14.4	10.0	7.1	5.4	16.	8.4	16.4	9.6	17.2	12.4	13.8	4.9	17.3	13.3	12.0	10.4
	2.1	2.5	2.3	2.6	0.43	2.4	2.9	0.4	4.8	1.3	4.7	0.8	4.9	2.1	1.7	4.9
Антрацен	0.2	0.4	0.0	0.2	0.7	0.7	0.7	0.9	0.7	0.6	0.9	0.3	0.8	0.7	0.6	0.5
	0.3	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.5	0.6	0.2	0.3	0.1	0.0	0.1	0.1	0.3	0.2
Флуорантен	1.2	3.2	2.5	1.2	5.8	3.5	2.8	3.2	6.3	4.6	5.3	0.8	7.1	3.8	4.0	3.7
	1.8	0.3	1.9	1.7	0.2	1.0	1.3	0.4	1.9	0.3	1.0	0.9	0.7	2.4	0.4	1.7
Пирен	1.1	3.0	1.0	0.4	4.9	3.4	4.0	6.0	5.6	5.2	4.8	3.1	6.2	6.4	4.5	3.0
	1.6	0.8	1.4	0.6	0.3	1.5	0.5	3.4	1.4	2.5	2.6	3.0	1.6	3.0	2.5	1.2
Бенз[a]антрацен	0.1	0.0	0.0	0.0	0.4	0.2	0.4	0.1	0.3	0.2	0.5	0.0	0.6	0.0	0.3	0.2
	0.2	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2	0.3	0.1	0.2	0.1	0.2	0.0	0.3	0.0	0.2	0.2
Хризен	0.1	0.4	0.0	0.2	1.5	0.5	0.9	2.2	1.5	0.9	0.7	0.3	1.0	0.7	1.1	1.0
	0.2	0.6	0.0	0.3	0.2	0.3	0.6	2.1	1.1	0.4	0.4	0.4	0.6	0.4	0.3	0.1
Бенз[b]флуорантен	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Бенз[к]флуорантен	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1	0.1
Бенз[a]пирен	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
∑ ПАУ	45.2	19.3	12.2	9.2	40.5	21.2	35.7	31.3	48.7	28.4	34.2	10.0	46.6	29.7	31.9	27.4
	18.2	2.5	0.9	4.9	10.1	4.6	11.4	11.7	8.3	5.6	11.5	4.0	4.4	6.1	8.7	9.6

Примечание. В числителе – среднее значение, в знаменателе – стандартное отклонение среднего.

полиаренов на поверхности органов растений ведет к повышению как доли поверхностного накопления ПАУ до 21%, так и его абсолютного содержания в органах в целом и на их поверхности. При высоких массовых долях полиаренов в растении они локализуются на поверхности коры и корней, что затрудняет поступление ПАУ внутрь. Выявлено снижение вклада поверхностного накопления с удалением от источника, его приближение к фоновым значениям.

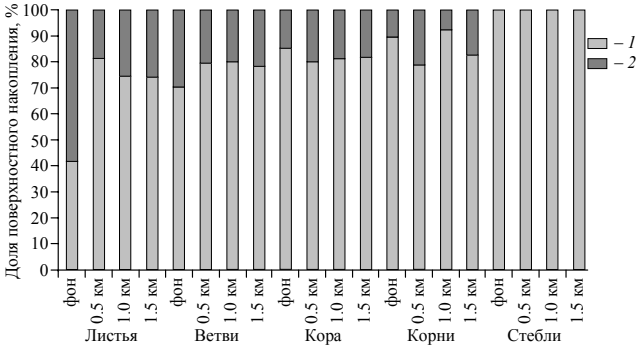

Рис. 1. Доля поверхностного накопления ПАУ в общем содержании полиаренов в разных органах *Betula nana*: *1* – внутреннее содержание, *2* – поверхностное накопление

Кластерный анализ накопления ПАУ показал четкое разделение поверхностного и общего содержания полиаренов во всех исследованных органах, которые формировали два отдельных кластера. Внутри кластера общего содержания четко выделяются в отдельные группы все органы берёзки фонового и загрязненных участков, различия явно выражены (рис. 2). Распределение органов берёзки внутри кластера позволяет выделить в отдельные группы накопление ПАУ в листьях и в стеблях на всех исследуемых расстояниях от источника. Содержание ПАУ в корнях на расстоянии в 1.5 км максимально приближено к содержанию в коре на данном расстоянии, в этот же кластер входит и содержание ПАУ в коре на других расстояниях от ТЭС. Также отмечается схожесть в накоплении ПАУ ветвями и корнями на разных расстояниях от ТЭС, следует отметить, что суммарное содержание ПАУ в данных органах, объединенных в кластер, почти одинаково.

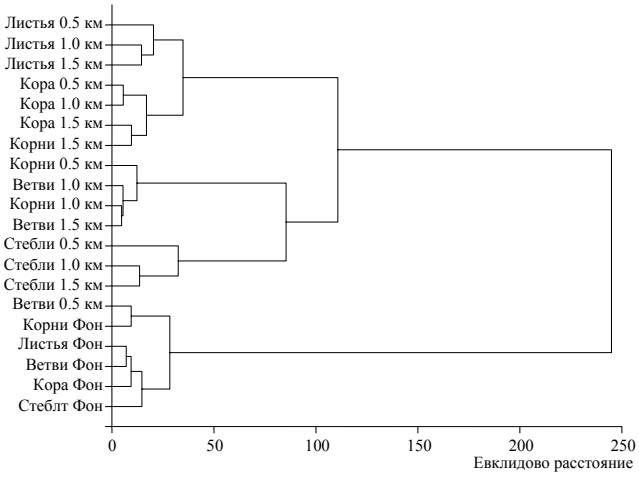

Рис. 2. Дендраграмма сходства в общем содержании полиаренов в *Betula nana* на фоновом участке и в зоне действия ТЭС, метод Варда

Факторный анализ общего содержания ПАУ в органах берёзки позволил выявить 3 основных фактора распределения ПАУ. Первый фактор обусловливает распределение нафталина и аце-

нафтена, он связан с их низкой молекулярной массой данных соединений, что способствует их большей растворимости и легкому проникновению в клетки, а также дальнему переносу от источника эмиссии. В отдельный фактор выделяется накопление наиболее токсичных ПАУ: бенз[a]пирена и дибенз[a,h]антрацена (коэффициент токсичности максимален и равен единице), которые трудно проникают в ткани растения и частично могут формироваться в процессе внутриклеточного синтеза. Остальные обнаруженные полиарены объединяются в один фактор, их поступление обусловлено работой теплоэлектростанции, распространение и поглощение подчиняется схожим закономерностям.

Кластерный анализ поверхностного накопления демонстрирует выделение в отдельный кластер содержания ПАУ в листьях на всех исследуемых участках. Это во многом связано с тем, что на листьях сосредоточена максимальная массовая доля ПАУ, к этому же кластеру отнесено накопление ПАУ на поверхности коры берёзки в 0.5 км от ТЭС. Накопление полиаренов другими органами подчиняется сходным закономерностям, в отдельный подблок выделяется поглощение ПАУ ветвями. Для фонового участка и участка в 1.5 км от ТЭС выявлены сходные особенности накопления ПАУ в коре и корнях.

Массовое соотношение разных органов кустарника друг к другу позволило рассчитать содержание полиаренов в целом кустарничке и оценить общий уровень загрязнения фитоценоза полиаренами. Суммарное содержание ПАУ в карликовой берёзке на загрязненных участках превышало фоновые значения в 2 раза и почти не менялось по мере удаления от ТЭС. Максимальные кратности превышения наблюдали для тяжелых ПАУ – до 50 раз, четкой зависимости изменения кратностей с расстоянием не выявлено. Кратности превышения суммарного поверхностного содержания изменялись от 1.3 до 1.7 для индивидуальных ПАУ: пирена, хризена, бенз[a]антрацена достигали 11 и были минимальны в 1 км от предприятия, при этом зависимости от расстояния были не значимы, отклонения входили в пределы погрешности.

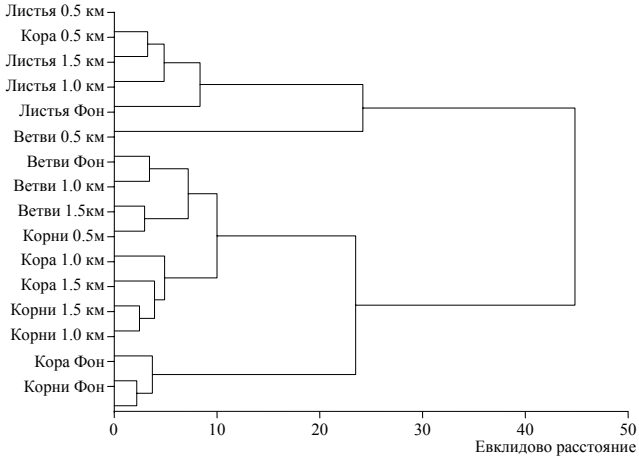

Рис. 3. Дендраграмма сходства поверхностного накопления полиаренов в *Betula nana* на фоновом участке и в зоне действия ТЭС, метод Варда

Для оценки уровня загрязненности территории было исследовано содержание ПАУ в органогенных горизонтах тундровых поверхностно глеевых почв (табл. 3). В почвах фонового и загрязненных участков было обнаружено 14 структур ПАУ: нафталин, аце-

нафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз[a]антрацен, бензо[b]флуорантен, бензо[k]флуорантен, бенз[a]пирен, дибенз[a,h]антрацен и бенз[ghi]перилен.

Таблица 3

Содержание ПАУ в органогенных горизонтах почв на разном расстоянии от ТЭС, нг/

ПАУ	Фон	Расстояние от ТЭС		
		0.5 км	1 км	1.5 км
Нафталин	53.8±4.4 50.2–61.0	237.4±60.4 141.0–303.8	308.2±24.8 268.8–336.2	261.1±15.9 239.4–284.4
Аценафтен	1.7±0.7 1.2–2.6	2.4±0.4 1.8–3.0	2.9±1.2 1.4–4.8	3.1±0.3 2.6–3.4
Флуорен	9.2±0.7 7.6–10.5	18.3±5.1 10.1–23.5	21.7±1.2 20.0–23.5	19.6±2.0 17.1–22.6
Фенантрен	72.7±53.0 149.8–68.4	196.4±64.6 93.2–266.6	248.5±8.6 234.4–255.6	187.7±17.0 170.6–215.3
Антрацен	2.3±0.3 1.9–2.8	8.9±3.0 4.1–12.0	10.4±2.6 6.5–13.6	7.4±0.8 6.4–8.7
Флуорантен	19.9±0.8 18.9–21.2	50.0±12.4 30.1–56.6	62.0±13.1 43.0–80.0	40.8±6.2 33.1–50.4
Пирен	21.7±0.9 20.6–23.0	70.3±13.9 47.6–82.2	81.6±9.8 68.2–96.0	54.0±6.5 45.8–64.0
Бенз[a]антрацен	3.5±0.6 2.6–4.4	16.9±3.2 11.7–19.8	20.8±4.5 15.8–28.0	12.3±0.6 11.5–13.2
Хризен	13.4±1.2 11.5–15.0	48.7±8.8 36.1–61.0	63.0±6.6 53.2–71.8	35.5±0.9 31.4–38.2
Бенз[b]флуорантен	15.9±4.9 7.9–20.7	37.8±4.6 33.8–45.2	44.0±6.2 38.9–54.2	34.1±2.6 31.4–5.7
Бенз[к]флуорантен	4.0±0.7 2.9–4.6	7.2±1.8 4.6–9.7	8.4±1.4 7.2–10.6	4.4±0.9 3.1–5.7
Бенз[a]пирен	4.8±0.4 4.1–5.4	12.0±1.0 10.6–13.3	15.3±2.0 13.2–18.6	8.5±0.7 7.7–9.7
Дибенз[a,h]антрацен	7.5±1.2 5.8–9.1	3.4±1.4 2.0–5.8	3.0±0.6 2.2–3.8	1.7±0.2 1.3–2.0
Бенз[ghi]перилен	19.4±5.6 12.0–27.8	25.6±8.9 13.0–38.2	18.7±5.1 13.4–27.0	14.1±2.3 11.0–17.6
∑ ПАУ	249.8±50.7 219.0–339.8	735.4±76.0 453.6–928.1	908.5±15.3 886.1–926.2	684.4±28.4 639.5–716.9
∑ легких ПАУ	198.2±30.1 133.0–268.8	649.4±70.0 375.8–827.3	819.±28.2 810.2–832.3	621.6±29.6 576.5–659.3
∑ тяжелых ПАУ	51.6±12.8 49.0–86.0	86.0±9.0 77.7–100.7	89.4±15.2 75.8–114.2	62.7±3.5 57.6–67.5

Примечание. В числителе – среднее значение и его стандартное отклонение, в знаменателе – размах варьирования (*min – max*).

ПАУ в почвах были представлены в основном легкими структурами: 79% на фоновом участке, 88 – 91% на загрязненных, что связано с повышенным содержанием тяжелых ПАУ в почвах фонового участка, которые могли сформироваться в результате педогенеза. Общее содержание полиаренов в почве превышало фоновые значения в 3 – 3.5 раза, подобные данные получены для легких ПАУ. Максимальные кратности были выявлены для нафталина и бенз[a]антрацена в 4 – 6 раз.

Кратности превышения тяжелых структур составили 1.7 раз на удалении в 0.5 и 1 км от ТЭС и 1.2 раза на расстоянии 1.5 км. Изменение содержания полиаренов в почве при удалении от ТЭС происходило с пиком накопления ПАУ в 1 км от ТЭС, что было характерно как для тяжелых, так и для легких структур.

В целом кустарничке нами также было отмечено повышение содержание ПАУ с удалением, что было характерно для корней и ветвей кустарника. Повышение содержания ПАУ в листьях на расстоянии 0.5 км могло быть связано с расположением берёзки в верхнем ярусе тундровой растительности, где в первую очередь могло происходить оседание загрязнителей на обильной листовой поверхности. Кроме того, изменения содержания полиаренов в листьях, в отличие от других органов и почв, позволяют оценить активность и особенности воздействия ТЭС лишь за один вегетационный период, что вполне применимо в целях мониторинга. Данные, полученные нами при анализе снежного покрова исследуемых территорий, позволяют утверждать, что перенос основной массы загрязнителей осуществляется на более дальние расстояния по сравнению с изученными – до 3 – 5 км. От 0.5 до 3 км происходит закономерное возрастание содержания ПАУ в снежном покрове (Yakovleva et al., 2018).

В зоне действия ТЭС почва загрязнена в большей степени, по сравнению с кустарничковой растительностью. Содержание полиаренов в органогенных горизонтах почв превышало содержание в берёзке в 3 раза на фоновом участке и в 5 – 6 раз на загрязненном. Это связано с тем, что берёзка хоть и распространена повсеместно, но не составляет основу напочвенного покрова, более значимое влияние на состав почвы оказывает моховой покров, который является основой его формирования и активным аккумулятором полиаренов. При этом сравнение качественного состава ПАУ органогенного горизонта и органов карликовой берёзки показало высокие значения коэффициентов корреляции r = 0.88-0.98 (n = 3), в меньшей степени состав ПАУ почв коррелировал с составом стеблей кустарника, в большей мере – с составом корней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что распределение ПАУ по органам берёзки на фоновом участке можно представить в виде уравнения: для общего содержания – *корни* > *кора* > > *листья* > *ветви* > *стебли*, для поверхностного накопления – *листья* > *ветви* > > *кора* > *корни*; на загрязненных участках для общего и поверхностного накопления выявлено идентичное распределение – *листья* > *кора* > *ветви* ≥ *корни* ≥ *стебли*.

Выявлено, что качественный состав ПАУ разных органов кустарника сходен между собой, самые низкие коэффициенты корреляции были выявлены между составом ПАУ стеблей и всех других органов берёзки.

Значимых изменений содержания полиаренов в разных органах берёзки и на их поверхности с расстоянием не выявлено. Содержание полиаренов в органах растений под действием ТЭС превышало фоновые значения в 2-3 раза, максимальные превышения были характерны для листьев. Поверхностное содержание полиаренов на коре и корнях в условиях загрязнения возрастало до 3 раз. Для листьев и ветвей обнаружено превышения фоновых значений поверхностного накопления ПАУ.

Для листьев и ветвей выявлено снижение доли поверхностного накопления в общем содержании ПАУ в условиях загрязнения по сравнению с фоновым участком, что объяснялось активизацией процессов аккумуляции полиаренов при значительном их поступлении на поверхность. Для коры и корней выявлена обратная тенденция – доля поверхностного накопления повышалась от фонового участка к загрязненным, ПАУ концентрировались на поверхности коры и корней, что затрудняло их дальнейшее поступление внутрь.

Кластерный анализ накопления ПАУ показал четкое разделение поверхностного и общего содержания полиаренов во всех исследованных органах. Распределение ПАУ в органах берёзки подчиняется трем основным факторам. Первый фактор обусловливает распределение наиболее легких структур нафталина и аценафтена, второй – накопление наиболее токсичных ПАУ: бенз[а]пирена и дибенз[а,h]антрацена, в третий фактор объединяются остальные полиарены.

Установлено, что общее содержание полиаренов в органогенных горизонтах почв под действием ТЭС превышало фоновые значения в 3 – 3.5 раза, с пиком накопления ПАУ в 1 км от ТЭС. Выявлена тесная корреляция между содержанием ПАУ в *B. nana* и органогенных горизонтах почв, в меньшей степени состав ПАУ почв коррелировал с составом ПАУ стеблей кустарника, в большей мере – с составом корней.

Показано, что органы карликовой берёзки могут быть использованы для индикации уровня загрязнения тундровых фитоценозов, но они не являются чувствительными индикаторами, позволяющими отследить изменения содержания ПАУ в экосистеме в пределах незначительных расстояний 0.5 – 1.5 км. При этом с помощью данного вида-индикатора можно проследить как краткосрочные, с помощью анализа листьев, так и долгосрочные, с использованием анализа коры, изменения содержания ПАУ. Полученные результаты показали, что при мониторинговых исследованиях лучше использовать общее содержание полиаренов в органах *Betula nana*, так как поверхностное накопление характеризуется большой вариабельностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, *Правительства Республики Коми* (*проект № 16-44-110581 р_а*) *и госбюджетной темы* (*№ Гр. АААА-А17-117122290011-5*).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Василевич Р. С., *Безносиков В. А.*, *Лодыгин Е. Д.*, *Кондратенок Б. М.* Комплексообразование ионов ртути (II) с гуминовыми кислотами тундровых почв // Почвоведение. 2014. № 3. С. 283 – 294.

Горшков А. Г., *Михайлова Т. А.*, *Бережная Н. С.*, *Верещагин А. Л.* Накопление полициклических ароматических углеводородов в хвое сосны обыкновенной на территории Прибайкалья // Лесоведение. 2008. № 2. С. 21 – 26.

Зубарева О. Н. Оценка дальности распространения выбросов в зоне влияния группы предприятий «Норильский никель» на основе анализа растений // Материалы Всерос. конф. с междунар. участием «Эволюция биосферы и техногенез», VI Всерос. симп. с междунар. участием «Минералогия и геохимия ландшафта горно-рудных территорий» и XIII Всерос. чте-

ний памяти акад. А. Е. Ферсмана «Рациональное природопользование», «Современное минералообразование». Улан-Удэ : Бурят. науч. центр СО РАН, 2016. С. 202 – 204.

Зубарева О. Н., *Данилова И. В.* Применение фитоиндикации для мониторинга состояния окружающей среды в зоне влияния группы предприятий «Норильский никель» // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность-2017 : материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. Севастополь : Изд-во Севастоп. гос. ун-та, 2017. С. 519 – 522.

Сушкова С. Н., *Минкина Т. М.*, *Манджиева С. С.*, *Тюрина И. Г.*, *Васильева Г. К.*, *Кизилкая Р.* Мониторинг содержания бенз(а)пирена в почвах под влиянием многолетнего техногенного загрязнения // Почвоведение. 2017. № 1. С. 105 – 116.

Родин Л. Е., *Ремцов Н. П.*, *Базилевич Н. И.* Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1968. 143 с.

Тентюков М. П. Изменение информативности индикационных характеристик тундровых кустарников в условиях аэротехногенного загрязнения // Сиб. экол. журн. 2008. № 2. С. 217 – 224.

Яковлева Е. В., *Безносиков В. А.*, *Кондратенок Б. М.*, *Хомиченко А. А.* Генотоксические эффекты в растениях Tradescantia (clon 02) индуцированные бенз[а]пиреном // Сиб. экол. журн. 2011. № 6. С. 805 – 812.

Яковлева Е. В., *Безносиков В. А.* Оценка показателей загрязнения тундровых фитоценозов полициклическими ароматическими углеводородами // Поволж. экол. журн. 2016. № 3. С. 352 – 366.

Bashkin V. N., *Barsukov P. A.*, *Arabsky A. K.* Specific Reaction of Biota to Environmental Pollution in Tundra Ecosystems // Biogeochemical Technologies for Managing Pollution in Polar Ecosystems, Environmental Pollution Ser. 2017. Vol. 26. P. 73 – 85.

Hamid N., *Syed J. H.*, *Junaid M.*, *Zhang G.*, *Malik R. N.* Elucidating the urban levels, sources and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Pakistan : Implications for changing energy demand // Science of the Total Environment. 2017. Vol. 619–620. P. 165 – 175.

Kargar N., *Matin G.*, *Matin A. A.*, *Buyukisik H. B.* Biomonitoring, status and source risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using honeybees, pine tree leaves, and propolis // Chemosphere. 2017. Vol. 186. P. 140 – 150.

Li H., *Liu G.*, *Cao Y.* Content and Distribution of Trace Elements and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Fly Ash from a Coal-Fired CHP Plant // Aerosol and Air Quality Research. 2014. Vol. 14. P. 1179 – 1188.

Li W., *Chen B.*, *Ding X.* Environment and Reproductive Health in China : Challenges and Opportunities // Environmental Health Perspectives. 2012. Vol. 120, № 5. P. A184 – A185.

Liu S., *Liu Q.*, *Ostbye T.* Levels and risk factors for urinary metabolites of polycyclic aromatic hydrocarbons inchildren living in Chongqing, China // Science of the Total Environment. 2017. Vol. 598. P. 553 – 561.

Luttmer C., *Ficko S.*, *Reimer K.*, *Zeeb B.* Deciduous vegetation (*Betula glandulosa*) as a biomonitor of airborne PCB contamination from a local source in the Arctic // Science of the Total Environment. 2013. Vol. 445. P. 314 – 320.

Ophof A. A., *Oldeboer K. W.*, *Kumpula J.* Intake and chemical composition of winter and spring forage plants consumed by semi-domesticated reindeer (*Rangifer tarandus tarandus*) in Northern Finland // Animal Feed Science and Technology. 2013. Vol. 185, iss. 3–4. P. 190 – 195.

Ribeiro J., *Silva T. F.*, *Filho J.*, *Mendonca G.*, *Flores D.* Fly ash from coal combustion – An environmental source of organic compounds // Applied Geochemistry. 2014. Vol. 44. P. 103 – 110.

Sahu S. K., *Bhangare R. C.*, *Ajmal P. Y.*, *Sharma S.*, *Pandit G. G.*, *Puranik V. D.* Characterization and quantification of persistent organic pollutants in fly ash from coal fueled thermal power stations in India // Microchemical J. 2009. Vol. 92, iss. 1. P. 92 – 96.

Verma S. K., *Masto R. E.*, *Gautam S.*, *Choudhury D. P.*, *Ram L. C.*, *Maiti S. K.*, *Maity S.* Investigations on PAHs and trace elements in coal and its combustion residues from a power plant // Fuel. 2015. Vol. 162. P. 138 – 147.

Yakovleva E. V., *Gabov D. N.*, *Beznosikov V. A.*, *Kondratenok B. M.*, *Dubrovskiy Y. A.* Accumulation of PAHs in Tundra Plants and Soils under the Influence of Coal Mining // Polycyclic Aromatic Compounds. 2017. Vol. 37, iss. 2–3. P. 203 – 218.

Yakovleva E. V., *Gabov D. N.*, *Beznosikov V. A.*, *Kondratenok B. M.* Accumulation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils and Mosses of Southern Tundra at Different Distances from the Thermal Power Plant // Eurasian Soil Science. 2018. Vol. 51, № 3. P. 268 – 275.

Е. В. Яковлева, Д. Н. Габов

POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS IN *BETULA NANA* (BETULACEAE, MAGNOLIÓPSIDA) UNDER THE IMPACT OF A THERMAL POWER PLANT

Evgenia V. Yakovleva and Dmitriy N. Gabov

Institute of Biology of Komi Scientific Centre
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
28 Kommunisticheskaya Str., *Komi Republic*, *Syktyvkar 167982*, *Russia*
E-mail: *kaleeva@ib.komisc.ru*

Received 23 March 2018, revised 27 September 2018, accepted 12 October 2018

Yakovleva E. V., Gabov D. N. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in *Betula nana* (Betulaceae, Magnoliópsida) under the Impact of a Thermal Power Plant. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2018, no. 4, pp. 495–512 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.18500/1684-7318-2018-4-495-512

The content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in *Betula nana* L. and soil organogenic horizons was studied at a control site and sites affected by a thermal power station (TPS) at distances of 0.5, 1.0, and 1.5 km from the source of pollution. The PAH distribution over the vegetative organs of dwarf birch was irregular. The qualitative composition of PAH in different organs of dwarf birch was similar. No significant changes in the PAH content in dwarf birch organs and at the surface of these organs at different distances from the TPS were revealed. The PAH content in the organs of plants affected by the TPS was 2–3 times higher than the background value, and the highest excess was found in leaves. The surface PAH concentration on the cork and roots increased by three times under contamination. No excess was revealed in leaves and branches. The excess over the background value in the soil at contaminated sites was 3–3.5 times with the maximal accumulation at a distance of 1 km. The PAH content in the soil was three times higher than that in the dwarf birch at the control site and 5–6 times at the contaminated sites. A strong correlation between the PAH concentrations in the soil and in *B. nana* was revealed. In the leaves and branches of *B.nana*, a decrease was revealed in the proportion of surface accumulation in the total PAH pool at contaminated sites as compared with the control site. An opposite trend was found for cork and roots. Cluster analysis showed clear separation between the surface and total PAH content in all plant organs under study. Factor analysis of the total PAH content in the organs of dwarf birch allowed us to reveal three main factors affecting the PAH distribution, with light structures, toxic components and the other polyarenes to be discerned. Dwarf birch organs can be used for indication of the contamination level in tundra communities. In order to analyze short-term changes and a long-term impact in the PAH content, we suggest using the PAH content in leaves and cork, respectively.

Key words: *Betula nana*, polycyclic aromatic hydrocarbons, organs, soil, surface accumulation, bioaccumulation, indication.

DOI: https://doi.org/10.18500/1684-7318-2018-4-495-512

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Komi Republic (project no. 16-44-110581 r_a) and the state budget theme (project no. AAAA-A17-117122290011-5).

REFERENCES

Vasilevich R. S., Beznosikov V. A., Lodygin E. D., Kondratenok B. M. Complexation of mercury(II) ions with humic acids in tundra soils. *Eurasian Soil Science*, 2014, vol. 47, no. 3, pp. 162–172.

Gorshkov A. G., Mikhailova T. A., Berezhnaya N. S., Vereshchagin A. L. Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in needles of Scots pine in Cis-Baikal region. *Lesovedenie*, 2008, no. 2, pp. 21–26 (in Russian).

Zubareva O. N. Estimation of emission distribution in the impact zone of enterprise complex "Norilski nikel" by plant analysis. *Materialy Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiyem* "*Evolyutsiya biosfery i tekhnogenez*", *VI Vseros. simp. s mezhdunar. uchastiyem* "*Mineralogiya i geokhimiya landshafta gorno-rudnykh territoriy*" *i XIII Vseros. chteniy pamyati akademika A. E. Fersmana "Ratsionalnoye prirodopolzovaniye*", "*Sovremennoye mineraloobrazovaniye*". Chita, Buryatskiy nauch. tsentr SO RAN, 2016, pp. 202–204 (in Russian).

Zubareva O. N., Danilova I. V. The use of phytoindica-tion for the environment monitorng in the impact zone of enterprise complex "Norilski nikel". *Environmental*, *Industrial and Energy Security – 2017*: *a Collection of Articles on the Materials of the Scientific and Practical Conference with International Participation*. Sevastopol, Izdatelstvo Sevastopolskogo gosudarstvennogo universiteta, 2017, pp. 51–52 (in Russian).

Sushkova S. N., Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Tyurina I. G., Vasil'eva G. K., Kızılkaya R. Monitoring of Benzo[α]pyrene Content in Soils Affected by the Long-Term Technogenic Contamination. *Eurasian Soil Science*, 2017, vol. 50, no.1, pp. 95–105.

Rodin L. E., Remezov N. P., Bazilevich N. I.. *Metodicheskie ukazaniya k izucheniyu dinamiki i biologicheskogo krugovorota v fitocenozah* [Methodological Guidelines on the Study of Dynamics of Biological Cycling in Phytocenoses]. Leningrad, Nauka Publ., 1968. 143 p. (in Russian).

Tentyukov M. P. Changes in the Information Content of the Indicative Characteristics of Tundra Shrubs under the Conditions of Aerotechnogenic Pollution. *Contemporary Problems of Ecology*, 2008, no. 2, pp. 217–224.

Yakovleva E. V., Beznosikov V. A., Kondratenok B. M., Khomichenko A. A. Genotoxic effects in Tradescantia plants (clon 02) induced by benz(a)pirene. *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, no. 6, pp. 805–812.

Yakovleva E. V., Beznosikov V. A. Assessment of indices of tundra phytocoenosis pollution with polycyclic aromatic hydrocarbons). *Povolzhskiy J. of Ecology*, 2016, no. 3, pp. 352–366 (in Russian).

Bashkin V. N., Barsukov P. A., Arabsky A. K. Specific Reaction of Biota to Environmental Pollution in Tundra Ecosystems. *Biogeochemical Technologies for Managing Pollution in Polar Ecosystems*, *Environmental Pollution Ser*., 2017, vol. 26, pp. 73–85.

Hamid N., Syed J. H., Junaid M., Zhang G., Malik R. N. Elucidating the urban levels, sources and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Pakistan: Implications for changing energy demand. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 619–620, pp. 165–175.

Kargar N., Matin G., Matin A. A., Buyukisik H. B. Biomonitoring, status and source risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using honeybees, pine tree leaves, and propolis. *Chemosphere*, 2017, vol. 186, pp. 140–150.

Li H., Liu G., Cao Y. Content and Distribution of Trace Elements and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Fly Ash from a Coal-Fired CHP Plant. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, vol. 14, pp. 1179–1188.

Li W., Chen B., Ding X. Environment and Reproductive Health in China: Challenges and Opportunities. *Environmental Health Perspectives*, 2012, vol. 120, no. 5, pp. a184–a185.

Liu S., Liu Q., Ostbye T. Levels and risk factors for urinary metabolites of polycyclic aromatic hydrocarbons inchildren living in Chongqing, China. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 598, pp. 553–561.

Luttmer C., Ficko S., Reimer K., Zeeb B. Deciduous vegetation (*Betula glandulosa*) as a biomonitor of airborne PCB contamination from a local source in the Arctic. *Science of the Total Environment*, 2013, vol. 445, pp. 314–320.

Ophof A. A., Oldeboer K. W., Kumpula J. Intake and chemical composition of winter and spring forage plants consumed by semi-domesticated reindeer (*Rangifer tarandus tarandus*) in Northern Finland. *Animal Feed Science and Technology*, 2013, vol. 185, iss. 3–4, pp. 190–195.

Ribeiro J., Silva T. F., Filho J., Mendonca G., Flores D. Fly ash from coal combustion – An environmental source of organic compounds. *Applied Geochemistry*, 2014, vol. 44, pp. 103–110.

Sahu S. K., Bhangare R. C., Ajmal P. Y., Sharma S., Pandit G. G., Puranik V. D. Characterization and quantification of persistent organic pollutants in fly ash from coal fueled thermal power stations in India. *Microchemical J.*, 2009, vol. 92, iss. 1, pp. 92–96.

Verma S. K., Masto R. E., Gautam S., Choudhury D. P., Ram L. C., Maiti S. K., Maity S. Investigations on PAHs and trace elements in coal and its combustion residues from a power plant. *Fuel*, 2015, vol. 162, pp. 138–147.

Yakovleva E. V., Gabov D. N., Beznosikov V. A., Kondratenok B. M., Dubrovskiy Y. A. Accumulation of PAHs in Tundra Plants and Soils under the Influence of Coal Mining. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2017, vol. 37, iss. 2–3, pp. 203–218.

Yakovleva E. V., Gabov D. N., Beznosikov V. A., Kondratenok B. M. Accumulation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils and Mosses of Southern Tundra at Different Distances from the Thermal Power Plant. *Eurasian Soil Science*, 2018, vol. 51, no. 3, pp. 268–275.