

АККУМУЛЯЦИЯ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ *BETULA NANA* В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕНЕЗА



Е.В. Яковлева, Д.Н. Габов, В.А. Безносиков

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар

Исследовано содержание полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в *Betula nana* L. на фоновом участке и на разном удалении от угледобывающего предприятия. Обнаружена тесная корреляция между содержанием полиаренов в угле, снежном покрове и растениях. Установлено, что содержание ПАУ в растениях на загрязненных участках превышает фоновые значения в 2 раза и незначительно снижается по мере удаления от шахты. Наибольшие кратности превышения отмечены для тяжелых полиаренов. Вклад поверхностного загрязнения в общее содержание ПАУ в растении составлял около 20 %. Распределение ПАУ по органам *Betula nana* неравномерно: лёгкие ПАУ активно проникали в листья и ветви *Betula nana* в интервале до 1 км от шахты, на расстоянии 1,5 км снижение поступления ПАУ на поверхность приводило к меньшей биоаккумуляции ПАУ растениями. В стебли березки ПАУ проникали в незначительных количествах. *Betula nana* может быть использована в качестве индикаторного вида, характеризующего степень загрязнения территории предприятий угольной промышленности ПАУ. При оценке краткосрочного загрязнения могут быть использованы листья растений, для анализа долгосрочного воздействия – кора *Betula nana*.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды, накопление, растения верхнего яруса, тундровая зона, добыча угля

Accumulation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons *Betula nana* under the Conditions of Technogenesis

E.V. Yakovleva, D.N. Gabov, V.A. Beznosikov

Institute of Biology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 167982 Syktyvkar, Russia

The content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in *Betula nana* L. was studied in the background area and at different distances from the coal mining enterprise. A close correlation was found between the content of polyarenes in coal, snow cover and plants. It was established that the content of PAHs in plants in polluted areas exceeds background values by 2 times and slightly decreases with distance from the mine. The largest multiples of exceedances are noted for heavy polyarenes. The contribution of surface contamination to the total PAH content in the plant was about 20 %. The distribution of PAHs in the organs of *Betula nana* is uneven: light PAHs actively penetrated the leaves and branches of *Betula nana* in the range of up to 1 km from the mine; In the stems of birch PAH penetrated in small quantities. *Betula nana* can be used as an indicator species characterizing the degree of pollution of the territory of the PAH coal industry enterprises. When assessing short-term contamination, plant leaves can be used, for analysis of long-term exposure – the bark of *Betula nana*.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons, accumulation, plants of the upper tier, tundra zone, coal mining

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-01-32-37

Тундровые экосистемы наряду с высоким ресурсным потенциалом характеризуются низкой устойчивостью к антропогенным воздействиям. В тундровой зоне европейского северо-востока России широко распространена добыча каменного угля. Установлено, что развитие угольной промышленности оказывает негативное влияние на здоровье населения, что во многом связано с повышенным содержанием полиаренов в каменном угле [1]. Данные полевых исследований, полученные за последние 10 лет, однозначно указывают на гено-

токсические скорее не прямые, а отсроченные эффекты на организмы, обитающие в загрязненной стойкими органическими загрязнителями (в том числе и полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ)) внешней среде [2]. В связи с этим исследование накопления полиаренов в фитоценозах тундровой зоны становится актуальной задачей современных экологических исследований.

Авторами были получены данные о вкладе разных видов растений в общее содержание полиаренов в нижнем ярусе южной кустар-

никовой тундры [3]. Установлено, что основной вклад в накопление ПАУ вносит мох *Pleurozium schreberi* Brid. Мхи чаще всего используются в целях мониторинга органических и неорганических загрязнителей в окружающей среде [4, 5]. Для биомониторинга загрязнения Белграда были использованы мхи *Sphagnum girgensohnii* Russow и *Hypnum cupressiforme* Hedw. Во мхах были обнаружены значительные количества нафталина, фенантрена, флуорантена, пирена, хризена, бенз[б]флуорантена, бенз[к]флуорантена, бенз[а]пирена. Основным

источником ПАУ авторы признают выбросы автотранспорта. Наибольшие концентрации ПАУ во мхах выявлены в центре города [6]. Так, биологический контроль загрязнения почвы в районе города Санта-Крус-де-Тенерифе (Испания) вблизи нефтеперерабатывающего завода полиаренами и тяжелыми металлами был проведен с помощью наземного мха *Pseudoscleropodium purum* Newd. Исследование не показало значительного загрязнения территории города полиаренами, высокие концентрации были выявлены лишь для флуорантена и пирена [7].

Верхний ярус кустарничковой тундры представлен в основном *Betula nana* (карликовая березка) и разными видами ив. Несмотря на распространенность карликовой березки в тундровой зоне, накопление различных загрязнителей в кустарничковых видах мало исследовано. В работе [8] были приведены результаты исследований накопления тяжелых металлов в тундровых кустарниках *Betula nana* и *Salix glauca* в условиях аэротехногенного загрязнения п-ва Ямал. Были изучены лишь побеги текущего года и выявлено, что кустарники отличаются невысокими коэффициентами биологического накопления тяжелых металлов. Мониторинговые исследования содержания полихлорированных бифенилов (ПХБ) в карликовой березке в Арктической зоне проводили для побегов текущего года. На загрязненных участках авторами были выявлены резкие повышения уровня содержания ПХБ в карликовой березке до 14 раз, через 3 года после рекультивации массовая доля поллютантов снижалась до базового уровня [9].

Малоисследованным аспектом в изучении накопления полиаренов растениями является выявление механизмов аккумуляции ПАУ из среды обитания. По мнению авторов, некоторые особенности аккумуляции полиаренов растениями поможет раскрыть анализ поверхностного загрязнения и общего содержания в них полиаренов. На данный момент существуют отдельные работы по определению массовой доли ПАУ на поверхности растений и общего содержания полиаренов в растениях разных видов. Комплексные исследования поверхностного [10] и общего содержания ПАУ [11] ограничены работами российских исследователей, посвященными накоплению ПАУ в растениях нижнего яруса южной кустарничковой тундры [12]. Для целостного понимания процессов биоаккумуляции

ПАУ необходим индивидуальный анализ содержания полиаренов во всех органах растения, что позволит получить новые данные об особенностях поглощения ПАУ.

Цель настоящей работы — изучение особенностей накопления ПАУ вегетативными органами *Betula nana* в условиях аэротехногенного воздействия.

Исследования содержания полиаренов в снежном покрове и *Betula nana* были проведены в южной кустарничковой Большеземельской тундре (Воркутинский район Республики Коми). Растения отбирали на фоновом участке в 6 км от ст. Хановей (34 км от г. Воркуты) и в районе влияния угольной шахты "Воркутинская" на расстоянии 0,5; 1,0 и 1,5 км от источника эмиссии в северо-восточном направлении. Отбор проб проводился с учетом розы ветров в трёхкратной повторности. Отдельно было проанализировано поверхностное загрязнение листьев, ветвей, коры и корней кустарника, также определяли общее содержание ПАУ в стеблях растения. Поверхностное загрязнение определяли, руководствуясь методикой, приведенной в работе [10]. Для полного извлечения ПАУ из растений использовали систему ускоренной экстракции растворителями ASE-350 (Dionex Corporation, США). Пробы снежного покрова отбирали на фоновом участке в трех повторностях, а в зоне действия шахты — в пяти повторностях. Снег растапливали и фильтровали. Анализ содержания полиаренов в талой воде проводили с помощью методики ПНД Ф 14.1:2.4.70-96 "Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации полициклических ароматических углеводородов в пробах питьевых, природных и сточных вод хроматографическим методом ВЭЖХ". Остаток на фильтре дважды подвергали ультразвуковой обработке с хлористым метилом, экстракты декантировали и объединяли. Полученный экстракт концентрировали с помощью аппарата Кудерна-Даниша с заменой растворителя на ацетонитрил и анализировали на содержание ПАУ. Качественное и количественное определение содержания ПАУ в исследуемых объектах осуществляли методом обращенно-фазовой ВЭЖХ в градиентном режиме и спектрофлуориметрическим детектированием на

хроматографе "Люмахром" (Люмэкс, Россия). Статистическую обработку для оценки достоверности расхождений средних данных проводили при помощи *t*-критерия Стьюдента для $P = 0,95$. Для проведения кластерного анализа использовали программу Statistica-6. При построении дендрограммы сходства для объединения данных применяли метод Варда, в качестве способа определения сходства использовали Евклидово расстояние.

Экспериментальная часть

Среди растений южной кустарничковой тундры *Betula nana* является наиболее распространенным видом, его вклад в биомассу данных фитоценозов составляет 33–35 %. По нашим данным, вклад *Betula nana* в вынос ПАУ в экосистемах кустарничковой тундры составляет 10 % для фоновых участков и до 16 % на загрязненных.

С целью определения характера загрязнения полиаренами *Betula nana* авторами был исследован уголь шахты "Воркутинская". В его составе было выделено 14 структур ПАУ, среди которых преобладали легкие структуры — нафталин и фенантрен (рис. 1). Ведущую роль нафталина и фенантрена в составе угля отмечали и другие исследователи, данные были получены на основании анализа содержания ПАУ в угле одиннадцати каменноугольных бассейнов по всему миру [13].

По составу снежного покрова судили о количествах загрязняющих веществ, поступающих на подстилающую поверхность исследуемых биоценозов (табл. 1). Анализ содержания ПАУ в снежном покрове фоновой участка и участка вблизи угледобывающего предприятия позволяет констати-

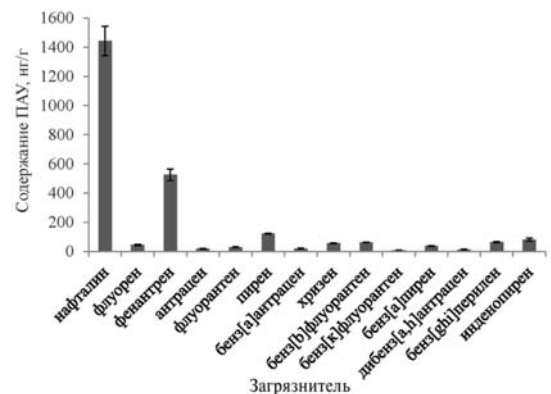


Рис. 1. Содержание ПАУ в угле шахты "Воркутинская"

Fig. 1. The content of PAH in the coal mine "Vorkuta"



Рис. 2. Доля поверхностного загрязнения в общем содержании ПАУ в растениях фоновой участка (А) и на удалении в 1 км от шахты "Воркутинская" (Б), %
Fig. 2. The share of surface contamination in the total content of PAHs in plants in the background area (A) and at a distance of 1 km from the Vorkutinskaya mine (B), %

ровать, что на загрязненный участок со снегом поступает в 15 раз больше полиаренов. ПАУ в снежном покрове как фоновой, так и аэротехногенно загрязненного участка на 99 % представлены легкими углеводородами, из которых нафталин, флуорантен и фенантрен составляют 89–91 %. Следует отметить, что в снежном покрове фоновой участка ПАУ в большей степени присутствуют в растворенной форме, кратности превышения составляют 3 раза для суммарного содержания ПАУ, для индивидуальных соединений, таких как нафталин и антрацен, достигают 6–11 раз.

На загрязненном участке ПАУ в снежном покрове присутствуют в виде аэрозольных выпадений и сконцентрированы на пылевых частицах. Суммарное содержание ПАУ на пылевых частицах превы-

шает массовую долю в снежной воде в 29 раз, по отдельным соединениям — до 31 раза. Концентрация ПАУ в снеге тесно коррелирует с содержанием их в угле, коэффициенты корреляции для растворенных полиаренов и представленных в виде аэрозолей были схожи и составили $r = 0,88 \div 0,89$ (при $P = 0,95, n = 5$).

На поверхности растений было идентифицировано 11 ПАУ: нафталин, аценафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз[а]антрацен, бензо[к]-флуорантен, бенз[а]пирен (табл. 2). На поверхности растений фоновой участка выявлены лишь легкие полиарены, которые на 47 % представлены фенантеном. Общее содержание ПАУ на поверхности растений на разном расстоянии от шахты "Воркутинская" превышало фоновые значения в 2 раза, по мере удаления от предприятия кратности превышения незначительно снижались. Наибольшие кратности превышения были характерны для хризена, бенз[а]антрацена, бензо[к]флуорантена и бенз[а]пирена и достигали 25 раз на удалении 0,5 км от источника. Содержание данных ПАУ на поверхности растений незначительно. Для остальных ПАУ кратности не превышали трех. Следует отметить, что нафталин, обнаруженный на поверхности растений фоновой участка, почти не выявлен на загрязненных территориях. В составе ПАУ угля шахты Воркутинская доля нафталина составляла 57 %,

в составе снежного покрова — 49 %. Это может быть объяснено проникновением нафталина внутрь растений в связи с наибольшей растворимостью. В условиях загрязнения у растений активизируется способность к поглощению ПАУ с поверхности, и в первую очередь в ткани проникают более лёгкие углеводороды. Доля фенантрена в общей сумме ПАУ в растениях остаётся максимальной и составляет 50–56 %.

Анализ общего содержания ПАУ в растениях показал присутствие 14 полиаренов. Кроме обнаруженных на поверхности, были выявлены бензо[б]флуорантен, дибенз[а, h]антрацен и бенз[ghi]перилен. Общее содержание ПАУ в растениях в условиях загрязнения превышало фоновые значения в 2–2,5 раза и снижалось по мере удаления от источника. Закономерности, выявленные для поверхностного загрязнения, обнаружены и для общего содержания ПАУ в растениях. Наибольшие превышения фоновых значений отмечены для хризена и тяжёлых полиаренов. Следует отметить, что в растениях загрязненных участков не выявлено значительного повышения содержания бенз[а]антрацена, которое отмечали для поверхностного загрязнения, что во многом связано с очень низким содержанием бенз[а]антрацена на поверхности растений фоновой участка. Повышение содержания бенз[а]антрацена на поверхности растений ведёт к увеличению его массовой доли в тканях.

Расчеты показали, что поверхностное содержание полиаренов тесно коррелирует с массовой долей ПАУ в тканях растений. Наивысшие коэффициенты корреляции выявлены для фоновой участка ($r = 0,84$), для загрязненных участков они варьировали от $r = 0,54$ на расстоянии 1 км до $r = 0,70$ на удалении 0,5 км от шахты. Высокие значения коэффициентов корреляции для фоновой участка могут быть объяснены сбалансированным состоянием, в котором находятся растения без дополнительного привноса ПАУ. При этом корреляции между содержанием тяжёлых полиаренов на поверхности и в тканях растений не выявлено. Это обусловлено практически отсутствием тяжелых ПАУ на поверхности растений. При этом в тканях растений обнаружено 5 структур тяжёлых ПАУ, хоть и в минимальных количествах (0,1–1 нг).

Высокие значения коэффициентов корреляции обнаружены для

Таблица 1. Содержание ПАУ в снежном покрове фоновой и загрязнённо-го участков, нг/л

Table 1. The content of PAHs in the snow cover of the background and contaminated sites, ng/l

ПАУ	Фон, ПАУ в растворенной форме		Фон, ПАУ в составе аэрозолей		Шахта, ПАУ в растворенной форме		Шахта, ПАУ в составе аэрозолей	
	\bar{X}	S \bar{x}	\bar{X}	S \bar{x}	\bar{X}	S \bar{x}	\bar{X}	S \bar{x}
Нафталин	95,9	8,2	16,7	0,2	51,9	6,9	1908,4	924,6
Фценафтен	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,8	5,3
Флуорен	30,2	1,1	26,3	11,5	24,9	3,2	779,9	341,6
Фенантрен	16,6	1,2	8,1	2,3	14,1	1,6	176,6	73,4
Антрацен	2,7	1,6	0,2	0,1	2,4	1,1	14,4	7,5
Флуорантен	6,7	0,4	2,3	1,4	5,5	1,7	52,8	14,3
Пирен	5,6	2,0	2,9	1,8	3,9	2,4	62,1	25,5
Бенз[а]антрацен	0,5	0,6	0,4	0,2	0,0	0,0	5,5	2,3
Хризен	1,0	0,2	0,9	0,4	0,9	0,3	17,6	9,9
Бенз[б]флуорантен	0,0	0,0	0,4	0,5	0,0	0,0	12,4	6,2
Бенз[к]флуорантен	0,0	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	2,3	1,0
Бенз[а]пирен	0,0	0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	6,3	3,4
Дибенз[а, h]антрацен	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Бенз[ghi]перилен	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,4	3,6
Индено[1,2,3-сd]пирен	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,1
ΣПАУ	159,1	7,4	58,6	17,2	103,8	9,7	3056,4	1414,4

Примечание. \bar{X} – среднее значение, S \bar{x} – стандартное отклонение.

состава ПАУ угля и *Betula nana*: $r = 0,89 \pm 0,92$ для поверхностного загрязнения и $r = 0,83 \pm 0,85$ для общего содержания ПАУ. В меньшей степени проявляется корреляция между составом полиаренов растений и снежного покрова.

Вклад поверхностного загрязнения в общее содержание ПАУ в растении для всех исследованных участков примерно одинаков и составляет около 20 %. При этом изменяется вклад разных структур полиаренов в содержание ПАУ на поверхности растений (рис. 2). На расстоянии в 1,5 км от шахты повышается доля флуорена, антрацена, бенз[а]антрацена и бензо[к]флуорантена в поверхностное загрязнение по сравнению с фоновым участком. На участках, расположенных в 0,5 и 1 км, доля перечисленных ПАУ увеличивается более существенно и возрастает пул хризена и бенз[а]пирена. По-видимому, более тяжелые полиарены выпадают на поверхность вблизи угледобывающего предприятия, а на расстоянии 1,5 км распространяются лишь более лёгкие вещества. При этом на загрязнённых участках доля нафталина и флуорантена снижается.

Исследовано содержание ПАУ на поверхности разных органов *Betula nana*. Был отмечен большой интервал варьирования данных, полученных для разных растений, который позволяет говорить лишь о тенденциях в изменении содержания ПАУ (рис. 3). Выявлено, что ПАУ в большей степени присутствуют на поверхности листьев березки, что связано с их большой проективной поверхностью. В меньшей степени ПАУ оседает на поверхности ветвей. Содержание ПАУ на поверхности коры и корней примерно одинаково на всех исследованных участках. На участке в 1,5 км от шахты концентрация ПАУ на коре и корнях приближается к их содержанию на ветвях растения, что обусловлено снижением массовой доли ПАУ на ветвях на данном удалении от источника. Аналогичные данные получены при исследовании качественного и количественного состава ПАУ деревьев промышленной зоны Тайшетского шпалопропиточного завода. Наибольшим накоплением ПАУ отличались листья по сравнению с корой и стволом дерева [14]. Авторами отмечено снижение содержания полиаренов в растениях по мере удаления от источника.

Содержание ПАУ на поверхности вегетативных органов по-разному изменяется от фонового к загрязненному участку и зависит от расстояния от шахты. Превышение содержания ПАУ на поверхности листьев незначительно по сравнению с фоновым участком и достигает 1,3 в 0,5 км от предприятия и, по мере удаления от источника, снижается до 1,2 раза. Кратности превышения большинства легких ПАУ составляют более 5 раз, что обусловлено отсутствием нафталина на поверхности листьев березки в условиях загрязнения. Наибольшие кратности превышения фоновых значений обнаружены в корнях и коре березки на расстоянии 0,5 км от шахты (до 3 раз), и их содержание практически не меняется при дальнейшем удалении от шахты. Наиболее резкое снижение содержания полиаренов по мере удаления от угледобывающего предприятия выявлено для ветвей березки.

Данные по общему содержанию ПАУ в разных частях березки представлены на рис. 4. Минимальное содержание ПАУ на всех исследованных участках отмечено для стеблей *Betula nana*. На расстоянии 0,5 км и 1,5 км от шахты содержание полиаренов в листьях, ветвях, коре и корнях примерно одинаково. На расстоянии 1 км от шахты максимальное содержание ПАУ характерно для листьев и примерно одинаково для ветвей, коры и корней.

Это связано со снижением поступления полиаренов на удалении в 1 км от источника, при этом со-

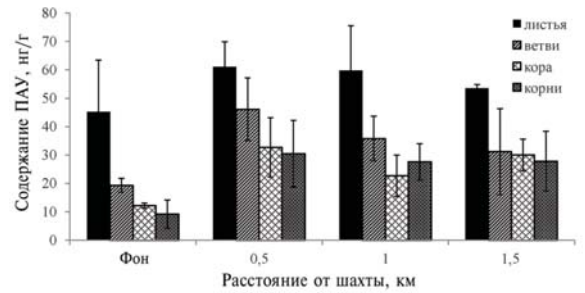


Рис. 3. Содержание ПАУ на поверхности разных органов *Betula nana*, нг/г

Fig. 3. The content of PAHs on the surface of various organs of *Betula nana*, ng/g

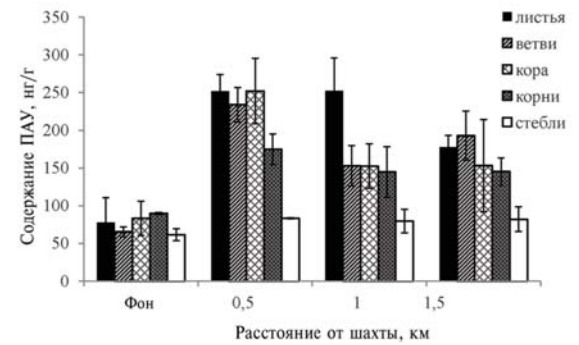


Рис. 4. Общее содержание ПАУ в разных органах *Betula nana*, нг/г

Fig. 4. The total content of PAHs in different organs of *Betula nana*, ng/g

держание полиаренов в листьях не отличается от значений в 0,5 км от предприятия в связи с тем, что на листья в первую очередь происходит оседание частиц, содержащих загрязнители. Повышение концентрации ПАУ на поверхности листьев не приводило к значительным превышениям общего содержания полиаренов в листьях над

Таблица 2. Содержание ПАУ на поверхности *Betula nana* (числитель) и общее содержание ПАУ в растении (знаменатель) на разном расстоянии от угледобывающего предприятия, нг/г

Table 2. The content of PAHs on the surface of *Betula nana* (numerator) and the total content of PAHs in the plant (denominator) at different distances from the coal mining enterprise, ng/g

ПАУ	Фон		Расстояние, км					
			0,5		1		1,5	
	\bar{X}	$S\bar{x}$	\bar{X}	$S\bar{x}$	\bar{X}	$S\bar{x}$	\bar{X}	$S\bar{x}$
Нафталин	2,4/25,9	1,2/0,6	2,0/60,4	2,9/0,4	0,0/47,7	0,0/5,6	0,0/50,2	0,0/5,6
Флуорен	0/1,8	0,0/0,4	0,05/1,58	0,07/0,9	0,0/1,2	0,0/0,2	0,0/1,3	0,0/0,3
Фенантрен	1,5/6,7	0,1/0,6	2,6/8,6	0,7/0,5	3,0/6,9	0,1/0,4	2,3/7,8	0,2/0,3
Антрацен	6,3/26,4	0,02/1,7	15,1/68,6	0,8/7,7	14,3/51,9	2,9/4,7	13,1/54,5	1,6/7,8
Флуорантен	0,2/0,9	0,02/0,11	0,9/2,5	0,01/0,03	0,8/2,1	0,3/0,2	0,8/2,1	0,1/0,3
Пирен	1,6/3,8	0,4/1,0	3,6/12,7	0,8/2,0	3,3/10,6	0,9/2,3	3,8/10,2	1,9/2,1
Бенз[а]антрацен	1,2/5,0	0,01/1,1	4,0/14,9	0,9/2,2	2,0/9,9	0,1/1,2	2,8/11,2	0,9/1,9
Хризен	0,01/0,42	0,02/0,27	0,3/1,4	0,1/0,2	0,3/1,1	0,05/0,2	0,1/1,0	0,1/0,2
Бенз[б]флуорантен	0,2/1,4	0,1/0,5	1,2/5,8	0,05/0,9	1,4/5,7	0,2/0,6	0,8/5,2	0,2/0,8
Бенз[к]флуорантен	0,0/0,0	0,0/0,0	0,0/0,7	0,0/0,5	0,0/0,9	0,0/0,4	0,0/0,7	0,0/1,0
Бенз[а]пирен	0,0/0,05	0,0/0,02	0,1/0,5	0,1/0,1	0,1/0,3	0,1/0,1	0,0/0,4	0,0/0,06
Бенз[ghi]перилен	0,0/0,1	0,0/0,1	0,0/0,4	0,0/0,2	0,1/0,5	0,1/0,2	0,0/0,6	0,0/0,2
ΣПАУ	13,5/72,5	1,2/2,3	30,0/178,0	6,1/12,1	25,4/139,7	2,1/16,5	23,6/146,1	2,4/16,4

Примечание. См. табл. 1.

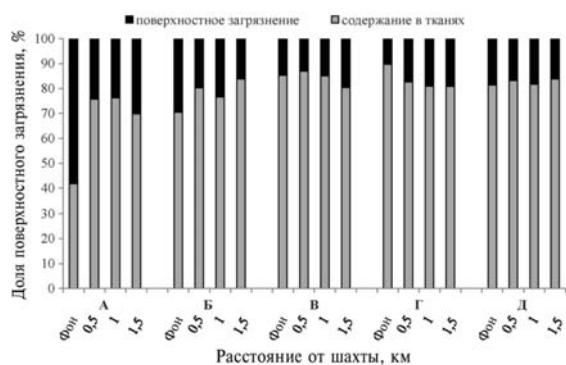


Рис. 5. Доля поверхностного загрязнения в общем содержании ПАУ в листьях (А), ветвях (Б), коре (В), корнях (Г) и в самом растении (Д) *Betula nana* на фоновом участке и на разном удалении от шахты "Воркутинская", %

Fig. 5. The proportion of surface contamination in the total PAH content in the leaves (A), branches (B), bark (C), roots (D) and in the plant itself (E) *Betula nana* in the background area and at different distances from the Vorkuta mine, %

их содержанием в других частях, подвергающихся внешнему воздействию, что во многом связано с листопадностью березки.

Содержание ПАУ в листьях, ветвях и коре в 3–3,5 раза превышало фоновые значения на расстоянии 0,5 км от шахты. Для корней максимальные превышения норм достигают 2 раз. На расстоянии в 1–1,5 км от шахты содержание ПАУ в ветвях, коре и корнях *Betula nana* было примерно одинаково и снижалось по сравнению с участком, удалённым на 0,5 км от предприятия. Для листьев снижение характерно на удалении в 1,5 км от источника. Содержание ПАУ в стеблях превышало фоновые значения в 1,3 раза и практически не менялось в зависимости от расстояния. Полученные данные позволяют предположить, что ПАУ проникают с поверхности в стебли березки в очень незначительных количествах.

Содержание полиаренов в разных органах изменяется аналогично изменению поверхностного загрязнения. Коэффициенты корреляции $r = 0,84 \pm 0,99$.

Доля поверхностного загрязнения от общего содержания ПАУ в листьях березки на фоновом участке составляет 60 %, на загрязнённых — 25–30 % (рис. 5). Данные свидетельствуют об активном проникновении, в основном лёгких ПАУ, в листья при высоком уровне загрязнения. Доля поверхностного загрязнения листьев увеличивается на расстоянии 1,5 км, где поступление ПАУ на поверхность снижается. В меньшей степени подобные закономерности выявлены для ветвей

березки. В коре доля поверхностного загрязнения меняется незначительно, а в корнях повышается в условиях загрязнения. При высоких концентрациях полиаренов они концентрируются на поверхности корней, что затрудняет поступление ПАУ в наземную часть растений.

Анализ дендрограммы сходства состава ПАУ на поверхности разных органов и содержания ПАУ в органах березки позволил выявить 3 основных однородных группы. В первый кластер объединены массовая доля ПАУ в органах фоновых растений и содержание ПАУ в стеблях кустарника. Эти данные подтверждают слабую способность стеблей поглощать ПАУ с поверхности растения. Второй кластер включает в себя содержание полиаренов на поверхности растений. Особенно чётко обособлено содержание ПАУ на поверхности листьев загрязнённых участков. Отдельными блоками выделены поверхностное загрязнение органов березки фоновой участка и поверхностное загрязнение корней коры и ветвей участков, подверженных загрязнению.

В третий кластер выделено содержание полиаренов во всех органах загрязнённых участков, кроме стеблей. Следует отметить, что несколько обособлен участок на расстоянии в 0,5 км от шахты, что может быть объяснено большим поступлением ПАУ на поверхность растений. Содержание ПАУ в корнях близко на участках в 0,5; 1 и 1,5 км, что скорее связано с тем, что эффект снижения уровней содержания полиаренов с расстоянием менее выражен для корней по сравнению с частями, находящимися под прямым воздействием атмосферных выпадений.

Таким образом, можно предположить, что ПАУ в условиях загрязнения активно проникают с поверхности во все органы березки, за исключением стеблей растения. При этом состав полиаренов на поверхности растений фоновой и загрязнённого участка схожи между собой.

Выводы

Методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на поверхности *Betula nana* были идентифицированы 11 структур ПАУ: нафталин, аценафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз[а]антрацен, бензо[к]флуо-

рантен, бенз[а]пирен. При определении общего содержания полиаренов в растении кроме перечисленных были выявлены бензо[б]флуорантен, дибенз[а, h]-антрацен и бенз[ghi]перилен.

Обнаружена тесная корреляция между содержанием полиаренов в угле шахты "Воркутинская", снежном покрове и растениях, что позволяет констатировать, что угледобывающая промышленность является основным источником ПАУ в исследуемом районе.

Установлено, что содержание ПАУ в растениях на загрязнённых участках превышает фоновые значения в 2 раза и незначительно снижается по мере удаления от шахты. Наибольшие кратности превышения фоновых значений отмечены для хризена и тяжёлых полиаренов.

Выявлено, что вклад поверхностного загрязнения в общее содержание ПАУ в растении для всех исследованных участков примерно одинаков и составляет около 20 %. При этом изменяется вклад разных структур полиаренов в содержание ПАУ на поверхности растений, что зависит главным образом от их массы.

Показано, что распределение органов *Betula nana* по количеству полиаренов на поверхности можно представить в виде ряда листья > ветви > кора > корни, для общего содержания ПАУ в растении на загрязнённых участках ряд имеет следующий вид: листья > ветви = кора > корни > стебли. Общее содержание ПАУ фоновой участка одинаково для всех частей *Betula nana*.

Установлено активное проникновение, в основном лёгких ПАУ, в листья и ветви *Betula nana* при высоком уровне загрязнения (0,5–1 км), на расстоянии 1,5 км поступление ПАУ на поверхность снижается, что приводит к меньшей биоаккумуляции ПАУ. В стебли березки ПАУ проникают в незначительных количествах. На поверхности корней ПАУ концентрируются, что также затрудняет их поступление в наземную часть растений.

Betula nana может быть использована в качестве индикаторного вида, характеризующего степень загрязнения территории ПАУ, в частности при добыче каменного угля. При оценке краткосрочного загрязнения могут быть использованы листья растений, для анализа долгосрочного воздействия — кора *Betula nana*.

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственной темы № АААА-А17-117122290011-5" и гранта РФФИ и Правительства Республики Коми 16-44-110581 p_a.

Литература

1. 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.
2. Шахтамиров И.Я., Кравцов В.Ю. Значение биоэкологического мониторинга стойких органических загрязнителей и оценка их генотоксических эффектов в системе экологической безопасности. Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2014. № 1. С. 85–92.
3. Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М. Полициклические ароматические углеводороды в почвах и растениях нижнего яруса южной кустарниковой тундры в условиях техногенеза. *Почвоведение*. 2014. № 6. С. 685–696.
4. Doegowska S., Migaszewski Z.M. PAH concentration in the moss species *Hylocomium splendens* (Hedw.) B.S.G. and *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. From the Kielce area (south-central Poland). *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2011. Vol. 74. P. 1636–1644.
5. Migaszewski Z.M., Galuszka A., Crock J.G., Lamothe P.J., Dolegowska S. Interspecies and interregional comparisons of the chemistry of PAHs and trace elements in mosses *Hylocomium splendens* (Hedw.) B.S.G. and *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. from Poland and Alaska. *Atmospheric Environment*. 2009. Vol. 43. P. 1464–1473.
6. Vuković G., Urošević M. A., Goryainova Z., Pergal M., Škrivanj S., Samson R., Popović A. Activemoss biomonitoring for extensive screening of urban air pollution: Magnetic and chemical analyses. *Science of the Total Environment*. 2015. Vol. 521–522. P. 200–210.
7. Ares A., Fernandez J.A., Aboal J.R., Carballeira A. Study of the air quality in industrial areas of Santa Cruz de Tenerife (Spain) by active biomonitoring with *Pseudoscleropodium purum*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2011. Vol. 74. P. 533–541.
8. Тентюков М.П. Изменение информативности индикационных характеристик тундровых кустарников в условиях аэротехногенного загрязнения. *Сибирский экологический журнал*. 2008. № 2. С. 217–224.
9. 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.
10. 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.
11. Бельх Л.И. Распределение полициклических ароматических углеводородов в системе почва – растение. *Почвоведение*. 2009. № 9. С. 1083–1089.
12. Яковлева Е.В., Габов Д.Н. Аккумуляция полиаренов в растениях на разном удалении от угледобывающего предприятия. *Матер. докл. XXII Всерос. молодежной научной конф. "Актуальные проблемы биологии и экологии"*. Сыктывкар, 2015. С. 192–198.
13. Laumann S., Micic V., Krüge M.A., Achten C., Sachsenhofer R.F., Schwarzbauer J., Hofmann T. Variations in concentrations and compositions of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coals related to the coal rank and origin. *Environmental Pollution*. 2011. Vol. 159. P. 2690–2697.
14. Маковская Т.И., Дьячкова С.Г. Органические загрязнители в почвенно-растительном покрове зоны влияния шпалопропиточного производства. *Вестник Крас ГАУ*. 2009. № 6. С. 67–72.

References

1. 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.
2. Shakhmatirov I.Ya., Kravtsov V.Yu. Znachenie bioekologicheskogo monitoringa stoikikh organicheskikh zagryaznitatei i otsenka ikh genotoksicheskikh effektivov v sisteme ekologicheskoi bezopasnosti. *Mediko-biologicheskie i sotsial'no-psikhologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh situatsiyakh*. 2014. № 1. S. 85–92.
3. Yakovleva E.V., Gabov D.N., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M. Politsiklicheskie aromatcheskie uglevodorody v pochvakh i rasteniyakh nizhnego yarusa yuzhnoi kustarnikovoï tundry v usloviyakh tekhnogeneza. *Pochvovedenie*. 2014. № 6. S. 685–696.
4. Doegowska S., Migaszewski Z.M. PAH concentration in the moss species *Hylocomium splendens* (Hedw.) B.S.G. and *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. From the Kielce area (south-central Poland). *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2011. Vol. 74. P. 1636–1644.
5. Migaszewski Z.M., Galuszka A., Crock J.G., Lamothe P.J., Dolegowska S. Interspecies and interregional comparisons of the chemistry of PAHs and trace elements in mosses *Hylocomium splendens* (Hedw.) B.S.G. and *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. from Poland and Alaska. *Atmospheric Environment*. 2009. Vol. 43. P. 1464–1473.
6. Vuković G., Urošević M. A., Goryainova Z., Pergal M., Škrivanj S., Samson R., Popović A. Activemoss biomonitoring for extensive screening of urban air pollution: Magnetic and chemical analyses. *Science of the Total Environment*. 2015. Vol. 521–522. P. 200–210.
7. Ares A., Fernandez J.A., Aboal J.R., Carballeira A. Study of the air quality in industrial areas of Santa Cruz de Tenerife (Spain) by active biomonitoring with *Pseudoscleropodium purum*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2011. Vol. 74. P. 533–541.
8. Tentyukov M.P. Izmenenie informativnosti indikatsionnykh kharakteristik tundrovyykh kustarnikov v usloviyakh aerotekhnogennogo zagryazneniya. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*. 2008. № 2. S. 217–224.
9. 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.
10. Gorshkov A.G., Mikhailova T.A., Berezhnaya N.S., Vereshchagin A.L. Nakoplenie politsiklicheskikh aromatcheskikh uglevodorodov v khvoe sosny obyknovennoi na territorii Pribaikal'ya. *Lesovedenie*. 2008. № 2. S. 21–26.
11. Belykh L.I. Raspredelenie politsiklicheskikh aromatcheskikh uglevodorodov v sisteme pochva – rastenie. *Pochvovedenie*. 2009. № 9. S. 1083–1089.
12. Yakovleva E.V., Gabov D.N. Akkumulyatsiya poliarenov v rasteniyakh na raznom udalenii ot ugledobvayushchego predpriyatiya. *Mater. dokl. XKHII Vseross. molodezhnoi nauchnoi konf. "Aktual'nye problemy biologii i ekologii"*. Syktyvkar, 2015. C. 192–198.
13. Laumann S., Micic V., Krüge M.A., Achten C., Sachsenhofer R.F., Schwarzbauer J., Hofmann T. Variations in concentrations and compositions of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coals related to the coal rank and origin. *Environmental Pollution*. 2011. Vol. 159. P. 2690–2697.
14. Makovskaya T.I., D'yachkova S.G. Organicheskije zagryazniteli v pochvenno-rastitel'nom pokrove zony vliyaniya shpalopropitochного proizvodstva. *Vestnik Kras GAU*. 2009. № 6. S. 67–72.

Е.В. Яковлева – науч. сотрудник, Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, 167982 Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая 28, e-mail: kaleeva@ib.komisc.ru • Д.Н. Габов – науч. сотрудник, e-mail: gabov@ib.komisc.ru • В.А. Безносиков – зав. лабораторией, e-mail: beznosikov@ib.komisc.ru

E.V. Yakovleva – Research Scientist, Institute of Biology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 167982 Russia, Komi Republic, Syktyvkar, Kommunisticheskaya Str. 28, e-mail: kaleeva@ib.komisc.ru • D.N. Gabov – Research Scientist, e-mail: gabov@ib.komisc.ru • V.A. Beznosikov – Head of laboratory, e-mail: beznosikov@ib.komisc.ru