

НАКОПЛЕНИЕ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В РАСТЕНИЯХ ТУНДРЫ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В ОКРЕСТНОСТЯХ ГОРОДА ВОРКУТЫ

Е. В. Яковлева, Д. Н. Габов

ФГБУН Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН
(Сыктывкар, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 27 декабря 2017 г.

Изучено накопление полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) лишайниками, растениями и почвами в зонах действия ТЭС. Изменение содержания ПАУ в почве происходило с пиком накопления в 1 км от ТЭС и превышало фоновые значения в 3–3,5 раза. Мхи и лишайники более активно поглощали ПАУ, чем голубика обыкновенная. Для всех исследованных видов выявлено снижение поверхностного накопления при наибольшем общем содержании в них ПАУ. Содержание ПАУ в растениях снижалось с удалением от ТЭС, превышая фоновые значения в 2–5 раз. Мох плевроциум Шребера рекомендуется использовать для биоиндикации загрязнения ПАУ.

Ключевые слова: теплоэлектростанция (ТЭС), растения, лишайники, почва, южная тундра, поверхностное загрязнение, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), биоаккумуляция.

Введение

Активное развитие промышленности во всем мире ведет к интенсификации процессов загрязнения окружающей среды различными поллютантами, в том числе полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ). По данным литературы, основными антропогенными источниками поступления ПАУ в окружающую среду являются процессы, связанные со сжиганием угля [1; 2]. В настоящее время все больше внимания уделяется оценке состояния арктических регионов. В тундровой зоне Республики Коми широко распространены добыча каменного угля 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 [3]. Исследования показали повышение концентрации метаболитов ПАУ в моче детей, подвергавшихся воздействию выбросов теплоэлектростанций (ТЭС) [4].

Состав ПАУ в сажевых частицах, образующихся при сжигании угля, во многом зависит от свойств

и состава самого топлива и температуры его сгорания [2; 5; 6]. Исследования показали, что общее содержание ПАУ было на два порядка выше в угле, чем в летучей золе и зольной пыли. Высокомолекулярные ПАУ преобладали в угле и летучей золе, низкомолекулярные — в зольной пыли [7].

При наличии ряда работ по изучению состава ПАУ в золе, образующейся при сжигании угля, дальнейшей аккумуляции и миграции ПАУ уделялось мало внимания. Изучено влияние Новочеркасской ГРЭС, работающей на угле и природном газе, на накопление ПАУ в почве. Авторы установили, 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 1,6 км от источника [1].

Для оценки загрязнения ПАУ используются не только почвы. В промышленном районе Турции были исследованы образцы пчел, листьев сосны и прополиса с целью биоиндикации загрязнения ПАУ [8]. Медоносные пчелы продемонстрировали лучшие возможности в отношении мониторинга взвешенных ПАУ, листья сосны были лучшими биоиндикаторами следовых концентраций ПАУ.

Механизмы поглощения ПАУ растениями мало исследованы, вероятно механическое проникновение ПАУ в ткани растений через поры или устьица. С одной стороны, ПАУ вследствие липофильности молекулы могут накапливаться в липидном слое мембран растений, главным образом в процессе их осаждения из атмосферы на поверхности листа. С другой стороны, в виде растворимых в воде производных ПАУ достигают клеточной мембраны и вызывают нарушения ее интактности и увеличение проницаемости [9].

В наземных экосистемах высшие растения получают большую часть элементов и органических веществ через корневую систему, а низшие (мхи, лишайники) не имеют хорошо развитой сосудистой системы поглощения и зависят в большей степени от сухих и мокрых выпадений из атмосферы [10]. Способность лишайников к поглощению ПАУ показана норвежскими [11] и польскими [12] учеными.

Разные виды мхов часто используются в качестве биомониторов содержания ПАУ в природных экосистемах [13]. Для контроля загрязнения территории нефтеносных песков Атабаска (Канада) использовали сфагновые мхи [14]. В мониторинговых исследованиях загрязнения местности Кампания (Италия) был использован мох *Hypnum cupressiforme*. Авторы показали высокий уровень загрязнения исследованной местности, поглощение ПАУ мхом не зависело от точки его размещения [15]. Сходные исследования были проведены в Неаполе и Лондоне с использованием мхов *Sphagnum capillifolium* (Ehrh.) Hedw. и *Hypnum cupressiforme* Hedw. Было установлено, что *Sphagnum capillifolium* отличается большей способностью к биоаккумуляции ПАУ [16]. Исследования накопления ПАУ в *Hylocomium splendens* северной Испании позволили выявить сезонные изменения в содержании ПАУ во мхах, согласующиеся с сезонностью выбросов ПАУ в атмосферу. Содержание ПАУ во мхе тесно коррелировало с их растворимостью и липофильными свойствами [17].

Аккумуляция элементов высшими растениями происходит путем поглощения корнями и листьями. Видовые особенности и состояние листовых поверхностей, их расположение на растении играют важную роль в удержании частиц. Перенос элементов, связанных с частицами, внутрь растения осуществляется путем растворения частиц на влажных листьях; полученный раствор диффундирует сквозь кутикулу или проникает через трещины в ней [10]. Исследования содержания ПАУ в листьях *Quercus ilex* и эпифитном мхе *Leptodon smithii* в городских районах показали, что листья дуба с мощной восковой кутикулой активнее накапливали ПАУ, чем мох [18].

Проведены исследования содержания ПАУ в органических горизонтах почв, мхах и сосудистых растениях вблизи ТЭЦ, расположенной на архипелаге Шпицберген в районе поселка Баренцбург [19]. Авторы выявили, что наиболее показательным индикатором аэрозольного загрязнения ПАУ воздуха

является сообщество мхов с круглогодичным вегетационным периодом. Показано, что ПАУ могут распространяться на расстояния более 6 км. Показаны тесные корреляции между содержанием ПАУ в почвах и растениях в зоне действия ТЭЦ.

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

Целью данной работы было исследовать накопление ПАУ в тундровых фитоценозах под воздействием процессов сжигания угля.

Объекты и методы

Проведены исследования содержания ПАУ в органических горизонтах тундровых поверхностно-глебовых почв, лишайниках и растениях нижнего яруса южной тундры (Воркутинский район Республики Коми). Почвы и растения отбирались на фоновом участке в 6 км от станции Хановой (30 км от Воркуты) и в районе действия ТЭС на расстояниях 0,5, 1,0 и 1,5 км от источника эмиссии в северо-восточном направлении. Отбор проб проводился в августе, в конце вегетационного периода, с учетом розы ветров. Исследованы организмы трех систематических групп: лишайники рода *Peltigera*: пельтигера беложилковая (*Peltigera leucophlebia* (Nyl.) Gyeln.) на фоновом участке и пельтигера рыжеватая (*Peltigera rufescens* (Weiss) Humb.) на загрязненных участках, далее *Peltigera* sp.; мох плевроциум Шребера (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.), цветковое растение голубика обыкновенная (*Vaccinium uliginosum* L.).

Для отбора проб на каждом участке были заложены три пробных площадки [20]. На каждой площадке проводился отбор проб почв органогенного горизонта, лишайников и растений. Размер площадок 100×100 см. Живая и отмершая части мха анализировались отдельно. Кустарнички голубики разделяли на листья, стебли и корни (ягоды на растениях отсутствовали или их количество было минимально, что не позволило провести их исследование). Образцы почв и растений высушивали при комнатной температуре, измельчали и проводили химический анализ на содержание ПАУ. Для определения их поверхностного накопления лишайниками и растениями использовали нерастертые образцы.

Химико-аналитические исследования почв и растений выполнялись в Центре коллективного пользования «Хроматография» Института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. При подготовке проб растений к химическому анализу поверхностного загрязнения использовалась оригинальная методика, описанная А. Г. Горшковым [21].

Таблица 1. Содержание ПАУ в органогенных горизонтах почв на разном расстоянии от ТЭС, нг/г

ПАУ	Фон		Расстояние от ТЭС					
			0,5 км		1 км		1,5 км	
	\bar{X}	$S\bar{x}$	\bar{X}	$S\bar{x}$	\bar{X}	$S\bar{x}$	\bar{X}	$S\bar{x}$
Нафталин	53,8	4,4	237,4	60,4	308,2	24,8	261,1	15,9
Аценафтен	1,7	0,7	2,4	0,4	2,9	1,2	3,1	0,3
Флуорен	9,2	0,7	18,3	5,1	21,7	1,2	19,6	2,0
Фенантрен	72,7	53,0	196,4	64,6	248,5	8,6	187,7	17,0
Антрацен	2,3	0,3	8,9	3,0	10,4	2,6	7,4	0,8
Флуорантен	19,9	0,8	50,0	12,4	62,0	13,1	40,8	6,2
Пирен	21,7	0,9	70,3	13,9	81,6	9,8	54,0	6,5
Бенз[а]антрацен	3,5	0,6	16,9	3,2	20,8	4,5	12,3	0,6
Хризен	13,4	1,2	48,7	8,8	63,0	6,6	35,5	0,9
Бенз[б]флуорантен	15,9	4,9	37,8	4,6	44,0	6,2	34,1	2,6
Бенз[к]флуорантен	4,0	0,7	7,2	1,8	8,4	1,4	4,4	0,9
Бенз[а]пирен	4,8	0,4	12,0	1,0	15,3	2,0	8,5	0,7
Дибенз[а, h]антрацен	7,5	1,2	3,4	1,4	3,0	0,6	1,7	0,2
Бенз[ghi]перилен	19,4	5,6	25,6	8,9	18,7	5,1	14,1	2,3
Σ ПАУ	249,8	50,7	735,4	76,0	908,5	15,3	684,4	28,4
Σ легких ПАУ	198,2	30,1	649,4	70,0	819,2	8,2	621,6	29,6
Σ тяжелых ПАУ	51,6	12,8	86,0	9,0	89,4	15,2	62,7	3,5

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

Для полного извлечения ПАУ из почв и растений использовалась система ускоренной экстракции растворителями ASE-350 («Dionex Corporation», США). Пробу массой 1 г помещали в экстракционную ячейку и трижды экстрагировали смесью хлористого метилена и ацетона (1:1) при температуре 100°C. Затем экстракты концентрировали с применением аппарата Кудерна — Даниша при температуре в термостате 70°C и заменяли растворитель на гексан. Полученный концентрат пробы объемом 3 см³ очищали от неорганических примесей методом колоночной хроматографии с использованием оксида алюминия второй степени активности по Брокману. В качестве элюента использовали 50 см³ смеси гексана и хлористого метилена (4:1). Элюат концентрировали с применением аппарата Кудерна — Даниша при температуре в термостате 85°C до объема 5 см³, затем добавляли 3 см³ ацетонитрила и упаривали при температуре 90°C до полного удаления гексана. Концентрат пробы в ацетонитриле анализировали

на содержание ПАУ методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. Контроль точности результатов измерений проводился 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. Статистическая обработка для оценки достоверности расхождений средних данных проводилась при помощи t-критерия Стьюдента, $P = 0,95$.

Результаты и обсуждение

В органогенных горизонтах почв фонового и загрязненных участков было обнаружено 14 ПАУ (табл. 1). ПАУ в почвах были представлены

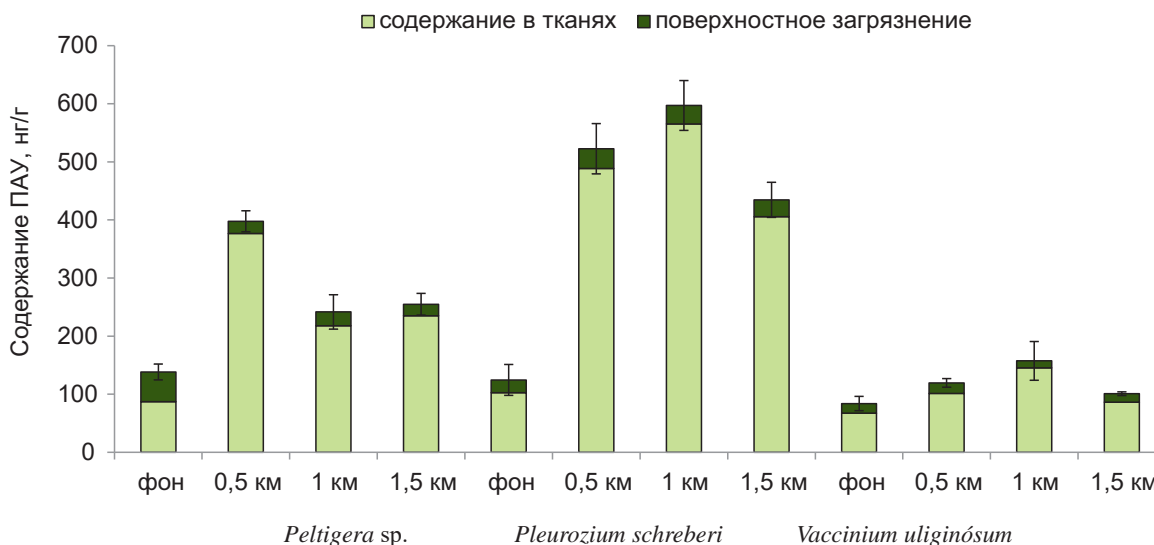


Рис. 1. Содержание ПАУ в разных видах на разном удалении от ТЭС

в основном легкими структурами: 79% на фоновом участке, 88—91% на загрязненных. Увеличение доли легких ПАУ в почвах в зоне действия ТЭС связано со спецификой выбросов предприятия.

Доля нафталина составила 21% общей суммы ПАУ на фоновом участке и 32—38% — на загрязненных, при этом его вклад в содержание ПАУ возрастал по мере удаления от ТЭС. Такие закономерности связаны со способностью нафталина перемещаться на более далекие расстояния в связи с низким молекулярным весом. Изменение содержания ПАУ 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.

Общее содержание ПАУ в почве превышало фоновые значения в 3—3,5 раза, подобные данные получены для легких ПАУ. Максимальные кратности были выявлены для нафталина и бенз[а]антрацена — в 4—6 раз. Кратности превышения тяжелых структур составили 1,7 раза на удалении в 0,5 и 1 км от ТЭС и 1,2 раза в 1,5 км.

На поверхности растений были идентифицированы 12 ПАУ (табл. 2), при определении общего содержания — 13 структур (табл. 3). Сравнение состава ПАУ в почве и растениях позволило выявить повышенные значения коэффициентов корреляции, которые составили $r = 0,84—0,93$ (при $P = 0,95$, $n = 3$) для фоновом участка и $r = 0,82—0,98$ (при $P = 0,95$, $n = 3$) для загрязненных. Для почв и всех изученных видов наименьшие коэффициенты корреляции наблюдались в 0,5 км от ТЭС. Несмотря на высокие значения коэффициентов корреляции с составом ПАУ почв, атмосферное осаждение, по-видимому, является основным путем поступления ПАУ в лишайники и растения исследуемых видов в зоне техногенного воздействия. Так как мох *P. schreberi* не имеет настоящих корней, а следовательно, и прямой связи с почвой, мы связываем повышенные

коэффициенты корреляции содержания ПАУ в почве и мхе *P. schreberi* с его широкой распространенностью и большим вкладом в общую биомассу тундровых фитоценозов [22]. По-видимому, разложение растительных остатков *P. schreberi* играет ключевую роль в формировании состава ПАУ почв. Для голубики *V. uliginosum* высокие значения коэффициентов корреляции могут быть связаны с накоплением ПАУ кустарничком из почвы через корневую систему.

Для мха *P. schreberi* и лишайника *Peltigera sp.* наблюдались сходные тенденции в накоплении ПАУ. Доля поверхностного загрязнения для данных видов составляла 18—37% от суммарного содержания на фоновом участке. На загрязненных участках она снижалась до 5—10% на разном удалении от ТЭС (рис. 1). Как во мхе *P. schreberi*, так и в лишайнике *Peltigera sp.* минимум вклада поверхностного накопления в общее содержание ПАУ наблюдалось при максимальном уровне загрязнения исследованных видов, который для мха отмечался в 1 км, для лишайника — в 0,5 км от ТЭС. Возможно, это связано с тем, что при меньшем поступлении ПАУ на поверхность способность к биоаккумуляции у данных видов ослабевает.

Для *V. uliginosum* доля поверхностного загрязнения составляла 20% на фоновом участке и 8—15% на загрязненных, т. е. снижение вклада поверхностного накопления было менее выражено, чем для мха *P. schreberi* и лишайника *Peltigera sp.*, что свидетельствовало о слабой способности *V. uliginosum* к аккумуляции ПАУ. Минимальный вклад поверхностного загрязнения, также как и для мха, был выявлен в 1 км от ТЭС при максимальном загрязнении голубики *V. uliginosum* ПАУ.

Таким образом, при повышении уровня выпадения ПАУ на поверхность тундровых фитоценозов биоаккумуляция ПАУ исследуемыми объектами интенсифицировалась, и ПАУ активно начинали

Таблица 2. Содержание ПАУ на поверхности растений и лишайников на разном расстоянии от ТЭС, нг/г

ПАУ	<i>Peltigera sp.</i>								<i>Pleurozium</i>			
	Фон		0,5 км		1 км		1,5 км		Фон		0,5 км	
	\bar{X}	$S\bar{x}$	\bar{X}	$S\bar{x}$	\bar{X}	$S\bar{x}$	\bar{X}	$S\bar{x}$	\bar{X}	$S\bar{x}$	\bar{X}	$S\bar{x}$
Нафталин	23,4	4,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Флуорен	2,8	0,3	2,7	0,1	2,2	0,5	1,7	0,3	2,6	0,2	1,7	0,3
Фенантрен	9,8	2,9	11,4	2,6	8,3	2,2	11,8	0,6	11,4	1,2	9,5	0,8
Антрацен	0,6	0,1	0,4	0,1	0,4	0,1	0,3	0,1	0,4	0,0	0,2	0,1
Флуорантен	9,0	2,6	3,7	1,2	4,4	0,8	2,0	1,7	3,5	0,6	5,8	1,9
Пирен	4,5	1,8	1,4	1,7	6,2	0,5	2,6	0,4	2,8	1,5	8,0	0,4
Бенз[а]антрацен	0,3	0,2	0,0	0,0	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,9	0,3
Хризен	0,6	0,0	0,2	0,3	1,1	0,3	1,4	0,8	0,8	0,6	2,0	0,6
Бенз[б]флуорантен	0,0	0,0	0,7	0,9	0,4	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1	3,2
Бенз[к]флуорантен	0,0	0,0	0,2	0,2	0,5	0,1	0,0	0,0	0,3	0,2	0,8	0,1
Бенз[а]пирен	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	1,0	0,4
Дибенз[а, h]антрацен	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΣПАУ	51	3,5	20,9	5,5	23,8	1,4	19,9	2,1	22,1	3,8	33,9	4,8
Σ легких ПАУ	51	3,5	19,8	4,5	22,9	1,5	19,9	2,1	21,6	3,7	28	3
Σ тяжелых ПАУ	0,0	0,0	1,0	1,2	0,9	0,5	0,0	0,0	0,5	0,2	5,9	3,8

Таблица 3. Содержание ПАУ в растениях и лишайниках на разном расстоянии от ТЭС, нг/г

ПАУ	<i>Peltigera sp.</i>								<i>Pleurozium</i>	
	Фон		0,5 км		1 км		1,5 км		Фон	
	\bar{X}	$S\bar{x}$	\bar{X}	$S\bar{x}$	\bar{X}	$S\bar{x}$	\bar{X}	$S\bar{x}$	\bar{X}	$S\bar{x}$
Нафталин	47,8	12	197,3	15,1	124,2	10,5	118,0	19,1	38,0	4,0
Флуорен	13,7	5	17,0	0,3	14,4	2,1	12,7	2,0	14,9	7,2
Фенантрен	45,9	8,4	81,3	0,5	45,7	17,7	74,4	3,5	41,0	8,9
Антрацен	2,9	0,8	4,6	0,6	3,6	0,4	3,6	0,5	2,1	0,6
Флуорантен	10,5	0,6	21,1	2,4	11,6	1,2	13,2	0,4	7,5	0,7
Пирен	12,7	3,4	29,6	1,7	24,3	0,9	14,0	1,8	9,2	1,6
Бенз[а]антрацен	0,7	0,3	5,3	0,3	3,4	0,8	2,5	0,4	1,0	0,1
Хризен	2,6	0,3	18,1	1,3	9,7	0,5	8,7	0,6	4,2	0,8
Бенз[б]флуорантен	1,1	0,7	14,9	2,3	1,3	1,6	4,4	3,3	1,0	0,7
Бенз[к]флуорантен	0,4	0,0	2,2	0,1	1,4	0,4	1,2	0,1	1,0	0,0
Бенз[а]пирен	0,0	0,0	5,7	0,9	2,2	0,6	2,2	0,1	1,3	0,2
Дибенз[а, h]антрацен	0,0	0,0	0,7	0,9	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	0,0	0,0	3,5	0,6
ΣПАУ	138,1	14	397,7	18,1	241,7	29,6	254,9	18,7	124,7	26,6
Σ легких ПАУ	136,6	19	374,2	19,7	236,8	30,6	247,1	21,6	117,9	8,2
Σ тяжелых ПАУ	1,5	6,1	23,5	3,2	4,9	1,4	7,8	3,3	6,7	0,4

	schreberi				Vaccinium uliginosum								
	1 км		1,5 км		Фон		0,5 км		1 км		1,5 км		
	\bar{X}	$S_{\bar{x}}$	\bar{X}	$S_{\bar{x}}$	\bar{X}	$S_{\bar{x}}$	\bar{X}	$S_{\bar{x}}$	\bar{X}	$S_{\bar{x}}$	\bar{X}	$S_{\bar{x}}$	
	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
	1,7	0,4	1,1	0,2	1,5	0,2	1,2	0,1	0,9	0,7	1,0	0,3	
	8,1	1,3	7,6	1,1	8,6	0,8	8,3	1,0	6,1	2,4	6,8	1,1	
	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,4	0,0	0,2	0,2	0,1	0,1	
	5,2	0,8	6,0	0,8	2,5	0,5	3,0	0,4	2,6	1,2	3,2	1,3	
	8,6	1,8	7,6	0,8	2,6	0,1	3,9	0,9	1,7	1,2	2,9	1,4	
	0,8	0,2	0,4	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	2,3	0,3	2,9	1,4	0,9	0,2	1,0	0,2	0,4	0,3	0,0	0,0	
	3,0	1,6	1,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	0,9	0,2	0,6	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	
	1,1	0,4	0,7	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,2	
	0,0	0,0	0,8	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	31,9	4,4	28,9	0,8	16,5	1,4	17,9	2,3	11,9	6,0	14,8	1,6	
	26,8	2,3	25,8	1,0	16,5	1,4	17,8	2,3	11,9	6,0	14,0	1,8	
	5	2,2	3,2	0,6	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,7	0,3	

	schreberi						Vaccinium uliginosum							
	0,5 км		1 км		1,5 км		Фон		0,5 км		1 км		1,5 км	
	\bar{X}	$S_{\bar{x}}$	\bar{X}	$S_{\bar{x}}$	\bar{X}	$S_{\bar{x}}$	\bar{X}	$S_{\bar{x}}$	\bar{X}	$S_{\bar{x}}$	\bar{X}	$S_{\bar{x}}$	\bar{X}	$S_{\bar{x}}$
	331,8	41,9	329,3	25	239,8	21,0	42,2	12,7	62,0	5,5	75,6	21,6	38,8	4,6
	15,4	2,1	22,2	1,3	17,8	2,2	4,6	0,7	6,4	0,3	8,4	0,4	7,4	0,8
	71,4	19,1	118,5	7,5	83,5	4,2	23,1	0,6	30,0	0,9	41,7	4,7	34,8	1,2
	6,0	0,3	6,0	0,2	5,0	0,8	0,8	0,1	1,3	0,1	2,0	0,2	1,9	0,2
	23,3	1,0	26,8	1,3	20,6	2,1	6,6	0,1	8,4	0,7	13,4	3,6	7,1	0,9
	36,2	6,0	47,0	7,2	23,7	6,0	4,6	0,2	7,2	0,6	11,0	2,7	6,7	0,5
	5,4	0,6	6,2	0,6	9,1	6,6	0,2	0,1	0,8	0,1	0,6	0,3	0,6	0,1
	14,6	1,1	17,3	1,3	10,6	0,4	1,6	0,1	3,1	0,3	2,9	1,1	1,9	0,0
	12,4	1,8	14,5	1,8	13,8	6,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5	0,3	0,2	0,3
	2,0	0,1	2,6	0,4	3,4	2,3	0,1	0,0	0,2	0,1	0,2	0,0	0,2	0,1
	4,2	0,2	4,8	0,6	5,6	3,3	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0
	0,0	0,0	1,9	1,2	1,6	0,6	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	0,9	0,7	0,7	0,5
	522,6	43,3	597,1	42,9	434,5	30,2	83,9	12,3	119,5	7,4	157,4	33,4	100,3	3,2
	504	43,6	573,4	41,8	410,1	21,5	83,8	12,4	119,2	7,4	155,7	32,6	99,1	3,0
	18,6	2,1	23,7	3,7	24,3	11,5	0,2	0,1	0,3	0,1	1,7	1,0	1,1	0,8

аккумулироваться мхом и лишайником и в меньшей степени голубикой. При этом минимумы поверхностного накопления совпадали с максимальным содержанием тяжелых ПАУ в растениях и лишайниках, для мха и лишайника они составляли 24 нг/г, для голубики — 2 нг/г в растениях и 15 нг/г в листьях. Так как атмосферное поступление признано основным источником попадания ПАУ в сосудистые растения, можно предположить, что хорошо облиственная голубика *V. uliginosum* поглощала ПАУ преимущественно листовой поверхностью, и активизация накопления ПАУ определялась накоплением тяжелых ПАУ именно в листьях. Сходные данные получены и другими учеными [23]. Проведено сравнительное исследование поглощения ПАУ листвой древесного растения *Cinnamotum camphora* урбанизированных районов. Были выявлены низкие значения фактора транслокации от лиственной пыли до мезофилла, которые указывали на плохую проникающую способность ПАУ. Полученные данные свидетельствовали о быстрой диффузии газофазных легких ПАУ и медленной десорбции тяжелых ПАУ, связанных с частицами лиственной пыли.

ПАУ во всех исследуемых видах были представлены в основном низкомолекулярными структурами, доля легких соединений в общей сумме ПАУ в растениях фонового участка составляла 95—99%, для загрязненных участков — 82—100%. На нафталин и фенантрен приходилось 63—78% от общей суммы ПАУ в растениях. Сходные данные были получены для лишайников, мхов и черники в зоне действия шахты Воркутинская [24]. Повышенные концентрации нафталина в растениях были выявлены и другими исследователями [19; 25]. Так, при мониторинговых исследованиях в зонах промышленных и урбанизированных территорий Аргентины с применением листьев *Ligustrum lucidum* нафталин был одним из доминирующих ПАУ во всех исследованных районах [25]. Вероятно, наличие тяжелых структур ПАУ внутри растений объясняется внутриклеточным синтезом ПАУ, так как их содержания были незначительны. Исследования накопления ПАУ в растительности вересковой пустоши *Caluna vulgaris*, *Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idaea* и *Eriophorum angustifolium* также показали, что в растениях преобладали такие ПАУ, как нафталин, фенантрен, флуорантен и бенз[б]флуорантен [26].

На поверхности исследованных видов растений фонового участка также были представлены в основном легкие ПАУ (95—99%, см. табл. 1). Доля нафталина и фенантрена составляла 51—65%. Значительные количества легких ПАУ на поверхности растений во многом могут быть обусловлены тем, что низкомолекулярные ПАУ часто имеют природное происхождение и являются необходимыми компонентами растений, участвующими в процессах обмена веществ [27]. Повышение содержания легких ПАУ может быть связано и с их дальним переносом в условиях тундры.

Суммарное содержание ПАУ на поверхности *Peltigera* sp. в зоне действия ТЭС было в 2,1—2,6 раза ниже фоновых значений. Это во многом обусловлено присутствием на поверхности лишайника фонового участка значительного содержания нафталина, который отсутствовал на поверхности в условиях загрязнения, а также может быть связано с разной видовой спецификой лишайников, произрастающих в зоне действия ТЭС (*Peltigera rufescens*) и на фоновом участке (*Peltigera leucophlebia*). Для мха *P. schreberi* и голубики *V. uliginosum* на загрязненных участках содержание ПАУ на поверхности почти не превышало фоновые значения, кратности превышения составляли 1,3—1,5 и 0,7—1,1 раза соответственно. Максимальные значения превышения содержания ПАУ были отмечены для мха *P. schreberi* и голубики *V. uliginosum* на участке, расположенном в 0,5 км от ТЭС.

Общее содержание ПАУ в растениях изменялось от фонового участка к загрязненному иным образом. Суммарная массовая доля ПАУ в лишайнике *Peltigera* sp., мхе *P. schreberi* и голубике *V. uliginosum* в зоне аэротехногенного воздействия превышала фоновые значения в 2—3, 3—5 и 1,2—1,9 раза соответственно. Для лишайника *Peltigera* sp. максимальное накопление ПАУ отмечалось на расстоянии 0,5 км от ТЭС, для мха *P. schreberi* и голубики *V. uliginosum* — в 1 км от предприятия. Максимальные кратности превышения во всех исследованных видах были выявлены для тяжелых ПАУ и достигали 15 раз.

В зависимости от вида суммарная массовая доля ПАУ в растениях на фоновом участке изменялась незначительно. Значения для мха и лишайника практически одинаковы, для *V. uliginosum* — в 1,5 раза ниже. Это во многом связано с коротким вегетационным периодом кустарников по сравнению со мхами и лишайниками, длительное время круглогодично накапливающими разного рода вещества из окружающей среды. Сравнение содержания ПАУ в растениях разных видов в зоне аэротехногенного воздействия показало, что наивысшая способность к биоаккумуляции ПАУ характерна для мха *P. schreberi*, минимальным накоплением отличается голубика *V. uliginosum*. Суммарное содержание ПАУ во мхе в условиях загрязнения превышает содержание в лишайнике в 1,3—2,5 раза, в кустарничке — в 4 раза.

Суммарное содержание ПАУ на поверхности растений всех исследованных видов на загрязненных участках примерно одинаково, отклонения находятся в пределах погрешности. Близкие значения содержания ПАУ на поверхности растений всех видов на фоновом и загрязненных участках при значительном превышении содержания ПАУ в тканях растений в условиях загрязнения позволяют предположить наличие определенного уровня содержания ПАУ на поверхности, который поддерживается растениями.

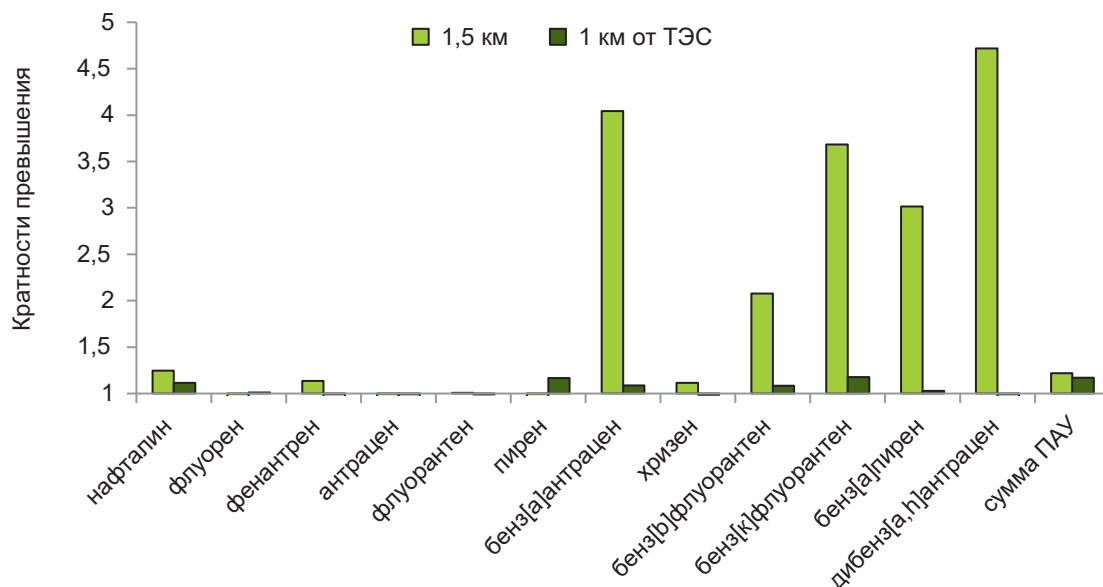


Рис. 2. Кратности превышения содержания ПАУ в отмершей части мха *P. schreberi* над содержанием в живой его части

Таким образом, для *Peltigera* sp. в отсутствие загрязнения характерны высокие количества ПАУ, в значительной степени концентрирующиеся на поверхности лишайника. В условиях загрязнения ПАУ начинают активно накапливаться, при этом содержание на поверхности снижается по сравнению с фоновым уровнем, и его вклад в общее содержание ПАУ резко падает. Для мха *P. schreberi* в естественных условиях не характерно активное накопление ПАУ на поверхности, большая часть ПАУ сосредоточена внутри растения, что может быть обусловлено и внутриклеточным синтезом. В условиях выбросов ТЭС происходит активное поглощение ПАУ мхом, поверхностное загрязнение возрастает по сравнению с фоновым уровнем, но его вклад в общее содержание ПАУ в растении снижается. Для голубики *V. uliginosum* на фоновом участке характерно незначительное содержание легких ПАУ, вероятно, сформировавшихся в самом растении, так как содержание на поверхности было небольшим. В условиях загрязнения массовая доля ПАУ на поверхности *V. uliginosum* оставалась на фоновом уровне, при этом общее содержание ПАУ в кустарничке увеличивалось лишь в 1,2—1,9 раза. ПАУ не концентрировались на поверхности и почти не проникали внутрь растения, что во многом может быть связано с почти полным одревеснением стволиков и корней голубики *V. uliginosum*, которые составляют 90% фитомассы данного растения.

Следует отметить, что существовала тенденция повышения содержания ПАУ в почвах и растениях с удалением от источника на 1 км. Наши более ранние исследования дальности переноса ПАУ от угольной шахты [22] показали, что ПАУ (в большей степени тяжелые) выпадали преимущественно на расстоянии 0,5 км. Данные, полученные при

изучении накопления ПАУ в зоне действия предприятия по производству технического углерода, показали, что при удалении от источника содержания ПАУ направленно уменьшались [28].

Возможно, более дальнее распространение ПАУ в зоне действия ТЭС было связано со значительной высотой трубы ТЭС и меньшим размером частиц, образующихся при сгорании угля, на которых перемещались ПАУ, по сравнению с частицами угольной пыли. Этот факт приводил к оседанию тяжелых ПАУ на более далеких расстояниях. Предположительно легкие ПАУ, в свою очередь, могли перемещаться еще дальше, и пик их присутствия мог бы быть отмечен на расстоянии 3—5 км от ТЭС. Преимущественное оседание ПАУ вблизи источника выявлено и при исследовании накопления ПАУ в почвах и растениях в зоне действия ТЭС. Авторы объясняют полученные данные особенностями рельефа. ПАУ в данном случае оседали в основном на подветренном склоне горы [9]. При исследовании накопления бенз[а]пирена в почвах под воздействием Новочеркасской ГРЭС [1] максимум накопления ПАУ в почвах был выявлен на удалении 1,6 км от источника, в то время как на расстоянии 1,2 км массовая доля ПАУ была ниже, что коррелирует с полученными нами данными.

Нами было исследовано распределение ПАУ по органам растений. Отличия в накоплении ПАУ живой и отмершей частью мха *P. schreberi* были минимальны и находились в пределах погрешности. Анализ общего содержания ПАУ в живой и отмершей части мха указывает на то, что на всех исследованных участках большинство ПАУ концентрируется в отмершей части (рис. 2), максимальные кратности превышения отмечены на удалении в 1—1,5 км от ТЭС.

Для голубики *V. uliginosum* на всех исследованных участках характерно большее накопление ПАУ

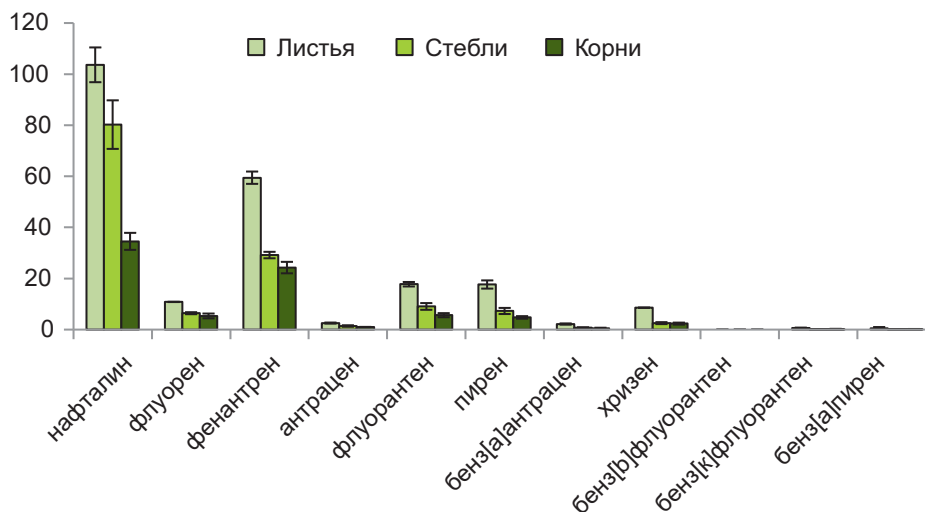


Рис. 3. Содержание ПАУ в органах *V. uliginosum* в 0,5 км от ТЭС

в листьях растений по сравнению со стеблями и корнями (рис. 3). Превалирующее содержание ПАУ в листьях обусловлено тем, что основная масса ПАУ оседает на листьях *V. uliginosum*, так как они имеют большую поверхность относительно других органов, и ПАУ с поверхности листовой пластины проникают внутрь растения. За счет листопадности кустарничек избавляется от избытка ПАУ. По мере удаления от ТЭС содержание ПАУ как на поверхности, так и в тканях листьев снижается, при этом пик накопления ПАУ для голубики *V. uliginosum* в целом приходится на расстояние в 1 км от ТЭС, так как при максимальном уровне загрязнения в поглощение ПАУ начинают активно включаться стебли растения и корневая система.

Таким образом, для голубики *V. uliginosum* в большей степени было характерно поступление ПАУ через листовую поверхность и в меньшей — через корневую систему, из которых ПАУ могли проникать в стебли растения.

Результаты кластерного анализа данных, полученных для органо-генных горизонтов почв и мха *P. schreberi* показывают, что загрязненные

участки сильно отличаются от фоновых по содержанию ПАУ (рис. 4). Это во многом объясняется тем, что состав ПАУ на поверхности растений и лишайников, а также в почве в условиях загрязнения обусловлен составом выбросов ТЭС. Для почвы характерно большее сходство между участками на расстояниях 0,5 и 1,5 км от ТЭС, для мха — близки участки, расположенные в 0,5 и 1 км. Это может быть связано с тем, что ПАУ в первую очередь поступают на поверхность мха и только потом достигают органо-генного горизонта. Поэтому для *P. schreberi* наблюдается более ранняя реакция по сравнению с почвой на изменение содержания ПАУ в окружающей среде уже на расстоянии в 0,5 км от источника, которая выражается в активном накоплении ПАУ. На расстоянии 1 км отмечается максимальное накопление ПАУ и в почвах, и во мхах за счет переноса ПАУ, связанного с высотой трубы ТЭС, а к 1,5 км, где выпадения минимизируются, содержание ПАУ в почвах и мхах снижается. Эти факторы позволяют использовать *P. schreberi* для индикации загрязнения тундровых экосистем ПАУ при проведении мониторинговых исследований.

Для голубики *V. uliginosum* и лишайников *Peltigera* sp. фоновый участок характерно сходство по

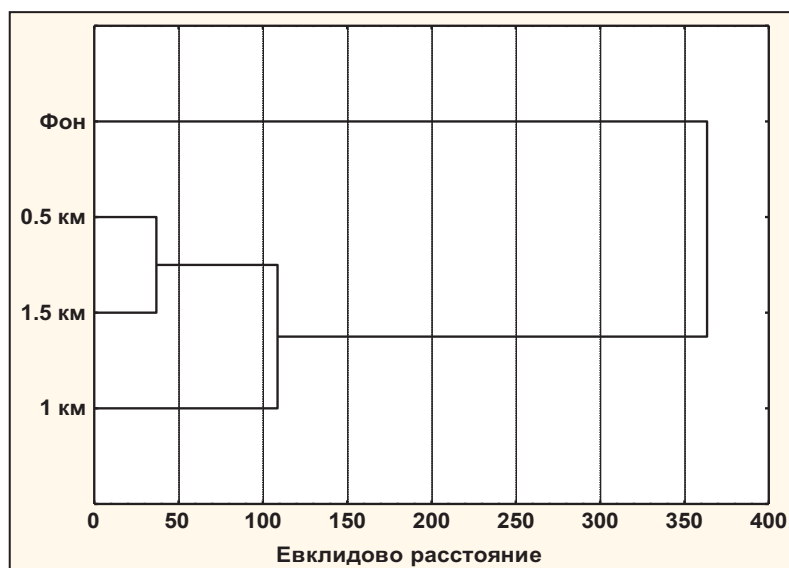


Рис. 4. Сходство в накоплении ПАУ в почвах на разном расстоянии от ТЭС, метод Варда

содержанию ПАУ с участком на удалении 1,5 км от ТЭС (рис. 5). Это может быть обусловлено снижением общего содержания ПАУ в *V. uliginosum* на более удаленном участке. Для лишайника снижение уровня биоаккумуляции начинает проявляться уже на расстоянии 1 км от источника.

Заклучение

В органических горизонтах почвы были идентифицированы 14 структур ПАУ. В растениях выявлено присутствие тех же структур за исключением аценафтена. На поверхности растений не было обнаружено также бенз[ghi]перилена. Суммарное содержание ПАУ в почве на загрязненных участках превышало фоновые значения в 3—3,5 раза. Изменение содержания ПАУ в почве с расстоянием происходило с пиком накопления в 1 км от ТЭС.

Выявлены высокие значения коэффициентов корреляции между содержанием ПАУ в органических горизонтах почв, лишайниках и растениях.

ПАУ в органических горизонтах почв и во всех исследуемых видах организмов были представлены в основном низкомолекулярными структурами, доля легких ПАУ в общей сумме ПАУ составляла 79—100%. Согласно расчетам соотношения содержания ПАУ на поверхности и в тканях растений мхи и лишайники активно поглощали ПАУ с поверхности. У голубики *V. uliginosum* способность к аккумуляции была выражена в меньшей степени. Для всех видов выявлено снижение поверхностного накопления при максимальном общем содержании ПАУ.

Наивысшая способность к биоаккумуляции ПАУ характерна для мха *P. schreberi*, минимальным накоплением отличалась голубика *V. uliginosum*. Суммарное содержание ПАУ во мхе в условиях загрязнения превышало содержание в лишайнике в 1,3—2,5 раза, в голубике — в 4 раза. Содержание ПАУ в тканях растений снижалось по мере удаления от

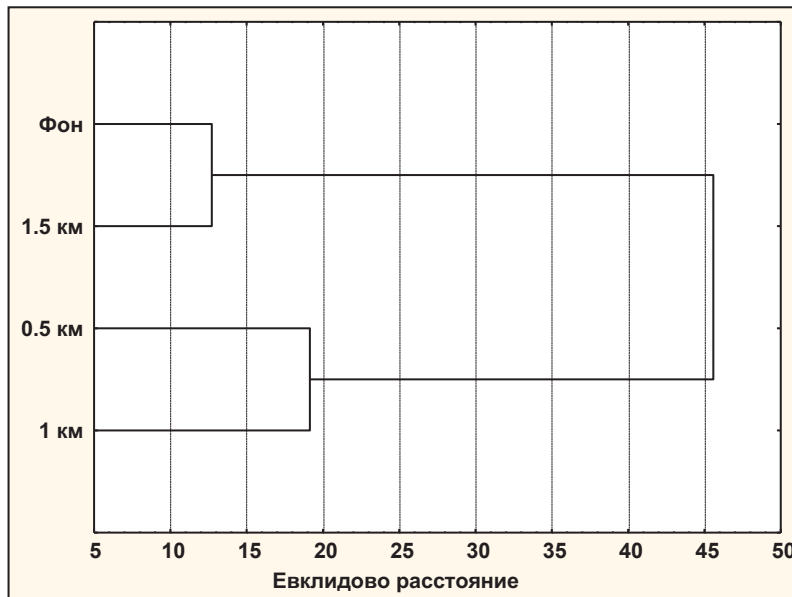


Рис. 5. Сходство в накоплении ПАУ *V. uliginosum* на разном расстоянии от ТЭС, метод Варда

ТЭС. Для лишайника *Peltigera* sp. максимум накопления был выявлен в 0,5 км, для растений *P. schreberi* и *V. uliginosum* — в 1 км от ТЭС. Эффект снижения содержания в большей степени был выражен у тяжелых ПАУ. Массовая доля ПАУ в *Peltigera* sp., *P. schreberi* и *V. uliginosum* в зоне аэротехногенного воздействия превышала фоновые значения в 2—3, 3—5 и 2 раза соответственно.

Результаты кластерного анализа показывают, что уже на расстоянии 1—1,5 км массовые доли ПАУ в *Peltigera* sp. и *V. uliginosum* были приближены к фоновым значениям, что, вероятно, обусловлено реакцией данных видов на уменьшение поступления ПАУ, которое приводит к снижению уровня биоаккумуляции. Для органических горизонтов почв и *P. schreberi* характерно объединение всех исследованных загрязненных участков в один кластер, который сильно отличается от фоновых показателей. Накопление ПАУ на данных участках обусловлено выбросами ТЭС. Для *P. schreberi* мы наблюдали более раннюю реакцию по сравнению с почвой на изменение содержания ПАУ в окружающей среде. *P. schreberi* в силу своей широкой распространенности и способности к активной аккумуляции ПАУ, а также благодаря высоким корреляционным взаимосвязям с изменениями содержания ПАУ в почвах может быть использован в целях биоиндикации загрязнения тундровых фитоценозов ПАУ.

Распределение ПАУ по органам растений неравномерно. Выявлено незначительное превышение содержания ПАУ в отмершей части мха *P. schreberi* над содержанием в живой. Для голубики *V. uliginosum* показано большее накопление ПАУ в листьях растений по сравнению со стеблями и корнями.

Таким образом, исследование накопления ПАУ в почвах, растениях и лишайниках в зоне действия ТЭС позволило выявить специфику распространения, поверхностного накопления и биоаккумуляции ПАУ организмами разных систематических групп под действием процессов сжигания угля. Выявлен индикаторный вид мха (*P. schreberi*) для оценки загрязнения экосистем ПАУ, что делает выполненную работу важной в прикладном аспекте. Полученные данные позволяют раскрыть механизмы накопления ПАУ видами разных систематических групп, что имеет большое значение для фундаментальной науки.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ и Правительства Республики Коми № 16-44-110581 р_а и госбюджетной темы № АААА-А17-117122290011-5.

Литература/References

1. Сушкова С. Н., Минкина Т. М., Манджиева С. С. и др. Мониторинг содержания бенз(а)пирена в почвах под влиянием многолетнего техногенного загрязнения // Почвоведение. — 2017. — № 1. — С. 105—116.
2. Ribeiro J., Silva T. F., Mendonca Filho J. G., Flores D. Fly ash from coal combustion — An environmental source of organic compounds. *Applied Geochemistry*, 2014, no. 44, pp. 103—110.
3. Яковлева Е. В., Безносиков В. А., Кондратенко Б. М., Хомиченко А. А. Генотоксические эффекты в растениях *Tradescantia* (clon O2), индуцированные бенз[а]пиреном // Сиб. экол. журн. — 2011. — № 6. — С. 805—812.
4. Yakovleva E. V., Beznosikov V. A., Kondratenok B. M., Khomichenko A. A. Genotoxic effects in *Tradescantia* plants (clon O2) induced by benz(a)pirene. *Contemporary problems of ecology*, 2011, no. 6, pp. 594—599.
5. Liu S., Liu Q., Ostbye T. Levels and risk factors for urinary metabolites of polycyclic aromatic hydrocarbons in children living in Chongqing, China. *Science of the total environment*. 2017, vol. 598, pp. 553—561.
6. 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, no. 14, pp. 1179—1188.
7. 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, no. 92, pp. 92—96.
8. 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.
9. Kargar N., Matin G., Matin A. A., Buyukisik H. B. Bio-monitoring, status and source risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using honeybees, pine tree leaves, and propolis. *Chemosphere*, 2017, vol. 186, pp. 140—150.
10. Ланкин А. В., Креславский В. Д., Худякова А. Ю. и др. Влияние нафталина на фотохимическую активность фотосистемы // Биохимия. — 2014. — Т. 79, № 11. — С. 1493—1504.
11. Lankin A. V., Kreslavski V. D., Zharmukhamedov S. K., Al-lakhverdiev S. I., Khudyakova A. Y. Effect of Naphthalene on Photosystem 2 Photochemical Activity of Pea Plants. *Biochemistry*, 2014, vol. 79, no. 11, pp. 1216—1225.

10. Баргальи Р. Биогеохимия наземных растений: Пер. с англ. И. Н. Михайловой / Ин-т экологии растений и животных РАН; Науч. ред. Н. С. Касимов. — М.: ГЕОС, 2005. — 454 с.
11. Bargagli R. Trace elements in terrestrial plants: an eco-physiological approach to biomonitoring and biorecovery. Berlin, Springer-Verlag, 1998, 324 p.
12. Muir D. C. G., Segstro M. D., Welbourn P. M., Toom D., Eisenreich S. J., MacDonald C. R., Whelpdale D. M. Patterns of accumulation of airborne organochlorine contaminants in lichens from the Upper Great Lakes region of Ontario. *Environ. Sci. Technol.*, 1993, vol. 27, no. 6, pp. 1201—1210.
13. Migaszewski Z. M. Determining organic compounds ratios in soils and vegetation of the Holy Cross Mts, Poland. *Water, Air and Soil Pollution*, 1999, vol. 111, no. 1—4, pp. 123—138.
14. Wu Q., Wang X., Zhou Q. Biomonitoring persistent organic pollutants in the atmosphere with mosses: Performance and application. *Environment International*, 2014, no. 66, pp. 28—37.
15. Zhang Y. F., Shotykh W., Zacccone C., Noernberg T., Pelletier R., Bicalho B., Froese D. G., Davies L., Martin J. W. Airborne Petroleum Dust is a Major Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Athabasca Oil Sands Region. *Environmental science & technology*, 2016, vol. 50, no. 4, pp. 1711—1720.
16. Iodice P., Adamo P., Capozzi F. Di Palma A., Senatore A., Spagnuolo V., Giordano S. Air pollution monitoring using emission inventories combined with the moss bag approach. *Science of the total environment*, 2016, vol. 541, pp. 1410—1419.
17. Vingiani S., De Nicola F., Purvis W. O., Concha-Grana E., Muniategui-Lorenzo S., Lopez-Mahia P., Giordano S., Adamo P. Active Biomonitoring of Heavy Metals and PAHs with Mosses and Lichens: a Case Study in the Cities of Naples and London. *Water air and soil pollution*. 2015, vol. 226, no. 8, p. 240.
18. Foan L., Domercq M., Bermejo R., Santamaria J. M., Simon V. Mosses as an integrating tool for monitoring PAH atmospheric deposition: Comparison with total deposition and evaluation of bioconcentration factors. A year-long case-study. *Chemosphere*, 2015, vol. 119, pp. 452—458.
19. De Nicola F., Spagnuolo V., Baldantoni D., Sessa L., Alfani A., Bargagli R., Monaci F., Terracciano S., Giordano S. Improved biomonitoring of airborne contaminants by combined use of holm oak leaves and epiphytic moss. *Chemosphere*, 2013, no. 92, pp. 1224—1230.
20. Демин Б. Н., Граевский А. П., Демешкин А. С., Власов С. В. Загрязнение почвенно-растительного комплекса в окрестностях рудника «Баренцбург» полициклическими ароматическими углеводородами // Арктика: экология и экономика. — 2012 — № 3 (7). — С. 62—73.
21. Demin B. N., Graevskiy A. P., Demeshkin A. S., Vlasov S. V. Zagryaznenie pochvenno-rastitel'nogo kompleksa v okrestnostyakh rudnika "Barentsburg" polysiklicheski-mi aromaticheskimi uglevodorodami. [Pollution of soil

- and vegetation complex in vicinities of Barentsburg mining by polycyclic aromatic hydrocarbons]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2012, no. 3 (7), pp. 62—73. (In Russian).
20. Родин Л. Е., Ремцов Н. П., Базилевич Н. И. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. — Л.: Наука, 1968. — 143 с.
- Rodin, L. E. Remtsov N. P., Bazilevich N. I. Metodicheskie ukazaniya k izucheniyu dinamiki i biologicheskogo krugovorota v fitotsenozakh. [Methodological Guidelines on the Study of Dynamics of Biological Cycling in Phytocenoses]. Leningrad, Nauka, 1968, 143 p. (In Russian)
21. Горшков А. Г., Михайлова Т. А., Бережная Н. С., Верещажин А. Л. Накопление полициклических ароматических углеводородов в хвое сосны обыкновенной на территории Прибайкалья // *Лесоведение*. — 2008. — № 2. — С. 21—26.
- Gorshkov A. G., Mikhaylova T. A., Berezhnaya N. S., Vereshchagin A. L. Nakoplenie politsiklicheskikh aromaticheskikh uglevodorodov v khvoe sosny obyknovvennoy na territorii Pribaykal'ya. [Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in needles of Scots pine in Cis-Baikal region]. *Lesovedenie*, 2008, no. 2, pp. 21—26. (In Russian)
22. Яковлева Е. В., Габов Д. Н., Безносилов 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.
- Yakovleva E. V., Gabov D. N., Beznosikov V. A., Kondratenok B. M. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils and Lower-Layer Plants of the Southern Shrub Tundra under Technogenic Conditions. *Eurasian Soil Science*, 2014, vol. 47, no. 6, pp. 562—572.
23. Yang B., Liu S., Liu Y., Li X., Lin X., Liu M., Liu X. PAHs uptake and translocation in *Cinnamomum camphora* leaves from Shanghai, China. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 574, pp. 358—368.
24. Яковлева Е. В., Габов Д. Н., Безносилов В. А., Кондратенко Б. М. Накопление полициклических ароматических углеводородов в почвах и растениях тундровой зоны под воздействием угледобывающей промышленности // *Почвоведение*. — 2016. — № 11. — С. 1402—1412.
- Yakovleva E. V., Gabov D. N., Beznosikov V. A., Kondratenok B. M. Accumulation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils and Plants of the Tundra Zone under the Impact of Coal-Mining Industry. *Eurasian Soil Science*, 2016, vol. 49, no. 11, pp. 1319—1328.
25. Tavera Busso I., Tames F., Silva J. A., Ratola N., Carreras H. Biomonitoring levels and trends of PAHs and synthetic musks associated with land use in urban environments. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 618, pp. 93—100.
26. Vane C. H., Rawlins B. G., Kim A. W., Moss-Hayes V., Kendrick C. P., Leng M. J. Sedimentary transport and fate of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) from managed burning of moorland vegetation on a blanket peat, South Yorkshire, UK. *Science of the Total Environment*, 2013, vol. 449, pp. 81—94.
27. Ровинский Ф. Я., Теплицкая Т. А., Алексеева Т. А. Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988. — 224 с.
- Rovinskiy F. Ya., Teplitskaya T. A., Alekseeva T. A. Fonovyy monitoring politsiklicheskikh aromaticheskikh uglevodorodov. [Monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1988, 224 p. (In Russian).
28. Геннадиев А. Н., Жидкин А. П., Пиковский Ю. И. и др. Углеводородное состояние почв в условиях загрязнения атмосферы локализованным промышленным источником // *Почвоведение*. — 2016. — № 9. — С. 1068—1078.
- Gennadiev A. N., Zhidkin A. P., Pikovskiy Yu. I., Kovach R. G., Koshovskiy T. S., Khlynina N. I. Hydrocarbon status of soils under atmospheric pollution from a local industrial source. *Eurasian Soil Science*, 2016, vol. 49, no. 9, pp. 1003—1012.

Информация об авторах

Яковлева Евгения Вячеславовна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, лаборатория химии почв, отдел почвоведения, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН (167982, Россия, Республика Коми, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28), e-mail: kaleeva@ib.komisc.ru.

Габов Дмитрий Николаевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, экоаналитическая лаборатория, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН (167982, Россия, Республика Коми, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28), e-mail: kaleeva@ib.komisc.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Яковлева Е. В., Габов Д. Н. Накопление полициклических ароматических углеводородов в растениях тундры в зоне влияния теплоэлектростанции в окрестностях города Воркуты // *Арктика: экология и экономика*. — 2018. — № 2 (30). — С. 18—30. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-18-30.

ACCUMULATION OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS IN PLANTS OF TUNDRA AFFECTED BY THERMAL POWER STATION IN THE VICINITIES OF VORKUTA

Yakovleva E. V., Gabov D. N.

Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the RAS (Syktyvkar, Russian Federation)

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Komi Republic, project nos. 16-44-110581 r_a and the state budget № AAAA-A17-117122290011-5.

Abstract

Polycyclic aromatic hydrocarbons PAH content was studied in organogenic horizons of surface gley soils, lichens and vascular plants from lower vegetation layer in the southern tundra. Soils and plants were sampled both from the control site and from the sites established at distances 0,5; 1,0 and 1,5 km from thermal power station. Ultrasound-assisted extraction was used to analyze surface pollution. In order to reach full PAH extraction from soils and plants, we used the system of fast extraction by solvents ASE-350 (Dionex Corporation, USA). The aim of our research was to investigate PAH accumulation in tundra communities impacted by coal combustion.

The total PAH content in soil at the contaminated sites exceeded background values by 3—3,5 times. Changes in PAH content in soil with the distance peaked at the 1 km distance. High correlation was found between PAH content in soil organogenic horizons, lichens and plants. PAHs were mostly presented by low molecular structures. Mosses and lichens absorbed PAH from the surface. *Vaccinium uliginosum* showed lower PAH accumulation capacity. For all the species under study, we found decrease in PAH accumulation at the maximal total PAH content level. The highest bioaccumulation capacity was revealed for *Pleurozium schreberi*, the lowest — for *Vaccinium uliginosum*.

PAH content in plants decreased with the distance from the power station. In *Peltigera* sp., the highest accumulation rate was found at distance 0,5 km, in *Pleurozium schreberi* and *Vaccinium uliginosum* — at distance 1 km from the power station. The total mass fraction of PAH in *Peltigera* sp. and *Pleurozium schreberi* at area affected by the power station was 2—3 and 3—5 times higher than the control values. In *Vaccinium uliginosum*, the excesses under the background values were up to 2 times. *Pleurozium schreberi* may be used as bioindicator due to its wide distribution area, high PAH accumulation capacity and high correlations with PAH changes in soil. PAH content in dead parts of *Pleurozium schreberi* slightly exceeded the living one. For *Vaccinium uliginosum*, the rate of PAH accumulation was higher in leaves than in stems and roots.

Keywords: thermal power station, plants, lichens, soil, southern tundra, surface contamination, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), bioaccumulation.

Information about the authors

Yakovleva Evgenia Vyacheslavovna, Candidate of Biological Sciences, researcher of soil science department of Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the RAS (28, Kommunisticheskaya st., Syktyvkar, the Komi Republic, Russia, 167982), e-mail: kaleeva@ib.komisc.ru.

Gabov Dmitriy Nikolaevich, Candidate of Biological Sciences, senior researcher of ecoanalytical laboratory of Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the RAS (28, Kommunisticheskaya st., Syktyvkar, the Komi Republic, Russia, 167982), e-mail: kaleeva@ib.komisc.ru.

Bibliographic description

Yakovleva E. V., Gabov D. N. Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in plants of tundra affected by thermal power station in the vicinities of Vorkuta. Arctic: ecology and economy, 2018, no. 2 (30), pp. 18—30. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-18-30. (In Russian).

© Yakovleva E. V., Gabov D. N., 2018