

DOI 10.22363/2313-2310-2019-27-3-184-198
УДК [504.43+504.73].054:547.912

Научная статья

Дальность распространения полициклических ароматических углеводов в тундровой зоне под воздействием ТЭС

Е.В. Яковлева, Д.Н. Габов

Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 167982, Республика Коми, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28

Аннотация. *Pleurozium schreberi* Brid. широко распространен в тундровой зоне и чувствителен к изменениям в составе полициклических ароматических углеводов (ПАУ) в экосистемах во временном отношении и с расстоянием, поэтому может использоваться в качестве индикатора загрязнения тундровых биоценозов полиаренами. Целью исследования было оценить дальность распространения ПАУ в условиях тундровой зоны на примере воздействия теплоэлектростанции. Работы проводились в Большеземельской тундре в Воркутинском районе Республики Коми. Исследовано поверхностное накопление и общее содержание ПАУ в *Pleurozium schreberi* и органогенном горизонте тундровых поверхностно-глеевых почв (Stagnic Cambisols) на фоновом участке и удалении от ТЭС 0,5; 1; 1,5; 3; 5 и 12 км. Содержание ПАУ в *Pleurozium schreberi* под воздействием ТЭС с расстоянием изменялось нелинейно. Максимум накопления отмечен на расстоянии в 3 км, затем содержание ПАУ снижалось и достигало фонового уровня в 12 км от источника. Высокомолекулярные ПАУ перемещались на расстояние до 3 км, где выпадали на поверхность мхов, легкие распространялись дальше, что обусловлено концентрированием тяжелых и легких структур на частицах разного диаметра. На поверхности мха фонового и загрязненного участка не выявлено присутствие нафталина. Суммарное содержание полиаренов на поверхности мхов примерно одинаково. На участке в 3 км отмечено резкое повышение массовой доли поверхностных ПАУ в 3 раза за счет возрастания массовой доли 4–5-ядерных полиаренов. В условиях загрязнения активизировались процессы биоаккумуляции ПАУ, полиарены с поверхности мха активно транспортировались внутрь. Исключением являлся участок в 3 км от ТЭС, где доля поверхностного накопления возрастала при максимальном загрязнении, то есть поступление ПАУ внутрь мха снижалось. Установлено, что для правильной идентификации пиков поступления полиаренов необходимо использовать отмершую часть *Pleurozium schreberi* или мох в целом. Изменения в содержании полиаренов в органогенных горизонтах почв идентичны с *Pleurozium schreberi*. Показано, что ПАУ в условиях тундры способны перемещаться на значительные расстояния. Приближенные к фоновым значения содержания ПАУ в *Pleurozium schreberi* выявлены лишь на расстоянии в 12 км от ТЭС, для органогенных горизонтов почв значения близкие к фоновым не выявлены.

Ключевые слова: *Pleurozium schreberi*, Stagnic Cambisols, полиарены, биоаккумуляция, распространение, тундра

Введение

В результате активной работы различных промышленных предприятий в тундровой зоне усиливается антропогенное воздействие на природные экосистемы. Часто в состав выбросов предприятий входят различные органические токсиканты, в том числе полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) [1]. ПАУ характеризуются повышенной канцерогенной, мутагенной и токсичной активностью [2; 3]. По данным литературы основными источниками поступления ПАУ в окружающую среду являются процессы, связанные со сжиганием угля [4; 5]. Поэтому исследование воздействия теплоэлектростанции (ТЭС) на уязвимые тундровые экосистемы наиболее интересно.

Исследования содержания ПАУ в органогенных горизонтах почв, мхах и сосудистых растениях вблизи ТЭС, расположенной на архипелаге Шпицберген в районе пос. Баренцбург [1], показали, что ПАУ могут распространяться на расстояния более 6 км. При этом оседание полиаренов происходит преимущественно вблизи источника, что авторы объясняют особенностями рельефа. ПАУ в данном случае оседали в основном на подветренном склоне горы. Влияние на аккумуляцию ПАУ во мхах *Hylocomium splendens* и *Pleurozium schreberi* топографических особенностей и метеорологических факторов отмечали и другие исследователи [6; 7].

Сходные данные получены для зоны воздействия Новочеркасской ГРЭС (государственной районной электростанции), работающей на угле и природном газе. Авторами установлено, что загрязнению бенз[а]пиреном наиболее подвержены почвы и травянистые растения пятикилометровой зоны на северо-западе от электростанции, совпадающей с линией преобладающего направления ветров, с максимумом накопления на расстоянии около 1,6 км от источника [4; 8]. Хорватскими учеными исследовано содержание ПАУ в органогенных горизонтах почв, отобранных на расстояниях 200, 300, 400 и 800 м от ТЭС и зольных отвалов в соответствии с преобладающим направлением ветра. Максимальное загрязнение ПАУ выявлено в непосредственной близости от источника. Полиарены с меньшим количеством колец могли распространяться на более дальние расстояния по сравнению с тяжелыми структурами [9].

Рядом авторов отмечено, что ПАУ могут переноситься на расстояния в несколько сотен километров и загрязнять геологическую среду вдали от их источника, что ставит вопрос об идентификации источников полиаренов [10]. Методы идентификации (соотношение различных структур ПАУ), предложенные авторами, хорошо применимы к аэрозолям и атмосферным осадкам, для почв и растений их применение усложняется наличием в данных объектах полиаренов природного происхождения.

Наши предыдущие исследования продемонстрировали, что *Pleurozium schreberi* может быть использован при мониторинге загрязнения тундровых экосистем ПАУ. Данный вид мха широко распространен в тундровой зоне. В *Pleurozium schreberi* Brid. сосредоточена основная массовая доля ПАУ среди растений южной тундры [11; 12]. Его вклад в потребление ПАУ составляет 70–80 % от накопления ПАУ в растениях нижнего яруса и 56–63 % от сум-

марного накопления в тундровых фитоценозах. В *Pleurozium schreberi* очень чутко реагирует на изменения содержания полиаренов как во временном аспекте [13], так и с расстоянием [14].

Дальность распространения ПАУ в условиях тундровой зоны ранее не исследовали. В связи с отсутствием в тундре древесной растительности полиарены могут распространяться на дальние расстояния, что ведет к нарушению естественных процессов в тундровых фитоценозах. Поэтому исследование дальности распространения ПАУ с использованием *Pleurozium schreberi* в качестве индикатора интересно как в прикладном плане, так и с точки зрения фундаментальной науки.

Цель данного исследования – оценить дальность распространения ПАУ в условиях тундровой зоны на примере воздействия теплоэлектростанции.

Материалы и методы

Работы проводили в Большеземельской тундре в Воркутинском районе Республики Коми. Исследовано поверхностное накопление и общее содержание ПАУ в *Pleurozium schreberi* Brid. и органическом горизонте тундровых поверхностно-глеевых почв (Stagnic Cambisols) на фоновом участке (в 6 км от ст. Хановой) и удалении от ТЭС 0,5; 1; 1,5; 3; 5 и 12 км с учетом преобладающего направления ветра в северо-восточном направлении. Мхи на каждом участке отбирали в трех повторностях с площадок 100×100 см. Живую и отмершую часть мха анализировали отдельно. С этих же площадок отбирались смешанные пробы почв органического горизонта.

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 [15]. Нерастертые высушенные пробы растений массой 1 г помещали в коническую колбу объемом 100 см³ и проводили ультразвуковую экстракцию образцов 60 см³ гексана в течение 30 мин. Экстракты декантировали через фильтр «красная лента». Полученный фильтрат концентрировали с применением аппарата Кудерна – Даниша при температуре в термостате 85 °С до объема 5 см³, затем добавляли 3 см³ ацетонитрила и упаривали при температуре 90 °С до полного удаления гексана. Концентрат пробы в ацетонитриле анализировали на содержание ПАУ методом высокоэффективной жидкостной хроматографии.

Для полного извлечения ПАУ из растений и почв использовали систему ускоренной экстракции растворителями ASE-350 Dionex Corporation (США). Пробу растения массой 1 г помещали в экстракционную ячейку и трижды экстрагировали смесью хлористого метилена с ацетоном (1:1) при температуре 100 °С. Затем экстракты концентрировали с применением аппарата Кудерна – Даниша при температуре в термостате 70 °С и заменяли растворитель на гексан. Полученный концентрат пробы объемом 3 см³ очищали от неорганических примесей методом колоночной хроматографии с использованием оксида алюминия II степени активности по Брокману. В качестве элюэнта использовали 50 см³ смеси гексана с хлористым метиленом (4:1). Элюат концентрировали с применением аппарата Кудерна – Даниша при темпера-

туре в термостате 85 °С до объема 5 см³, затем добавляли 3 см³ ацетонитрила и упаривали при температуре 90 °С до полного удаления гексана. Концентрат пробы в ацетонитриле анализировали на содержание ПАУ методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. Контроль точности результатов измерений проводили с использованием стандартного образца Certified reference material BCR-683 (European commission community bureau of reference) для растительных образцов. Standard Reference Material 1944 «New York/New Jersey Waterway Sediment» (National Institute of Standards & Technology, USA) использовали в качестве образца для контроля 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, $P = 0,95$. Построение графиков, гистограмм и расчет средних арифметических с определением ошибки средней выполнены в программе Microsoft Excel 7.0. Корреляционный и кластерный анализ проводили в программе Statistica 6.0. На рисунках отражены средние значения полученных данных, в качестве погрешностей указано стандартное отклонение среднего. При построении дендрограммы сходства для объединения данных применяли метод Варда, в качестве способа определения сходства использовали Евклидово расстояние.

Результаты и обсуждение

Мох *Pleurozium schreberi* активно аккумулирует полиарены, что позволяет использовать его для индикации загрязнения экосистем данными экотоксикантами. ПАУ могут иметь как природное, так и техногенное происхождение, поэтому в небольших количествах присутствуют и в естественных биоценозах. Согласно полученным данным, во мхах *Pleurozium schreberi* фонового участка выявлено присутствие 12 структур ПАУ: нафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз[а]антрацен, бензо[б]-флуорантен, бензо[к]флуорантен, бенз[а]пирен, бенз[ghi]перилен. На загрязненных участках дополнительно обнаружен дибенз[а,h]антрацен.

Результаты, ранее полученные для снежного покрова исследованных участков на расстоянии от 0,5 до 5 км от ТЭС, показали, что на расстоянии в 0,5 км от источника выявлено минимальное содержание ПАУ в снежном покрове. По мере удаления от ТЭС содержание ПАУ и в большей степени тяжелых структур полиаренов возрастало и достигало максимума на удалении 3 км от ТЭС. С дальнейшим удалением от источника происходило снижение содержания ПАУ [14].

Для мхов обнаружена сходная тенденция накопления ПАУ: некоторое увеличение содержания ПАУ во мхе выявлено на расстоянии в 1 км от ТЭС, а максимум накопления отмечен на расстоянии в 3 км. С дальнейшим удалением содержание полиаренов в *Pleurozium schreberi* снижалось и достигало фонового уровня на расстоянии 12 км от источника. Полученные закономерности характерны как для легких 2–4-ядерных, так и для тяжелых 5–6-ядерных структур ПАУ. Кратности превышения фоновых содержаний ПАУ на расстоянии в 1 и 3 км от предприятия составили 5 раз, на удалении в 1,5 км –

3,5 раз, в 5 км – 3 раза. Аналогично изменялось содержание легких ПАУ во мхах. Превышение содержание тяжелых ПАУ более выражено на расстоянии в 3 км – в 5 раз, по сравнению с расстоянием в 1 км, где оно составляло 3 раза. Также более выраженным являлось снижение массовой доли тяжелых ПАУ на расстоянии в 5 км – до кратностей превышения фоновых значений в 2 раза. То есть содержание низкомолекулярных ПАУ изменялось более плавно в связи с их большей летучестью по сравнению с тяжелыми структурами. Высокомолекулярные структуры, по-видимому, перемещались с воздушными потоками от трубы ТЭС на расстояние до 3 км, где выпадали на поверхность мхов, легкие же могли перемещаться дальше. Такой факт во многом связан с концентрированием тяжелых и легких структур на частицах разного диаметра. Исследования, направленные на изучение золы с ТЭС, работающей на каменном угле, позволили выявить изменения состава полиаренов в зависимости от размера частиц. Содержание 2, 3, 4-ядерных ПАУ уменьшалось с увеличением размера частиц сажи, для тяжелых полиаренов выявлена обратная тенденция [16]. Индийские исследователи показали, что тяжелые ПАУ преобладали в летучей золе, легкие ПАУ в зольной пыли [17].

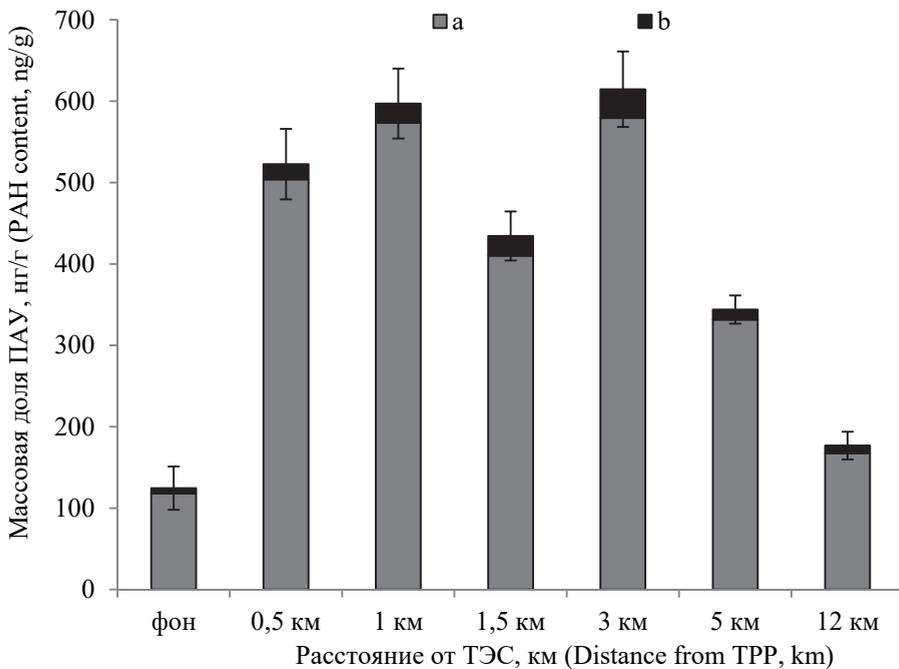


Рис. 1. Общее содержание ПАУ в *Pleurozium schreberi*, нг/г:
 a – \sum легкие ПАУ; b – \sum тяжелые ПАУ
 [Figure 1. Total PAHs content in *Pleurozium schreberi*, ng/g:
 a – \sum light PAH; b – \sum heavy PAH]

Следует отметить, что во мхе фоновом и загрязненных участках в большей степени представлены легкие полиарены, доля тяжелых структур от общего содержания ПАУ варьировала в пределах 4–6 %.

Исследование содержания полиаренов на поверхности мхов позволило выявить одиннадцать структур ПАУ. На большинстве исследованных участ-

ков обнаружено десять структур полиаренов: флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз[а]антрацен, бензо[б]флуорантен, бензо[к]-флуорантен, бенз[а]пирен. Дибенз[а,h]антрацен обнаружен на поверхности мха только на расстоянии в 1,5 км от источника, в тканях растения данный компонент обнаружен также на расстоянии в 1 и 3 км, в снежном покрове в 1,2 км от источника. Это позволяет утверждать, что дибенз[а,h]антрацен мог распространяться лишь на незначительные расстояния от ТЭС. Бенз[ghi]перилен отсутствовал в снежном покрове, а следовательно, и на поверхности мхов, то есть его накопление могло быть связано с внутриклеточным синтезом в растениях.

Следует отметить, что на поверхности растений как фонового, так и загрязненного участка не выявлено присутствие нафталина, при его значительном содержании в тканях *Pleurozium schreberi*. Нафталин в растениях фонового участка мог формироваться в процессе внутриклеточного синтеза, так как имеет сходную структуру с витаминами и гормонами. В условиях загрязнения в растения поступало дополнительное количество нафталина, и он, по-видимому, благодаря своей высокой растворимости и небольшому молекулярному весу, легко проникал в ткани растения, не концентрируясь на поверхности. Природное сходство низкомолекулярных ПАУ с витаминами и гормонами также может оказывать определенное стимулирующее воздействие на проницаемость клеточных мембран [18].

ПАУ на поверхности растений представлены в основном легкими полиаренами на 83–96 % на загрязненных участках и на 98 % на фоновом.

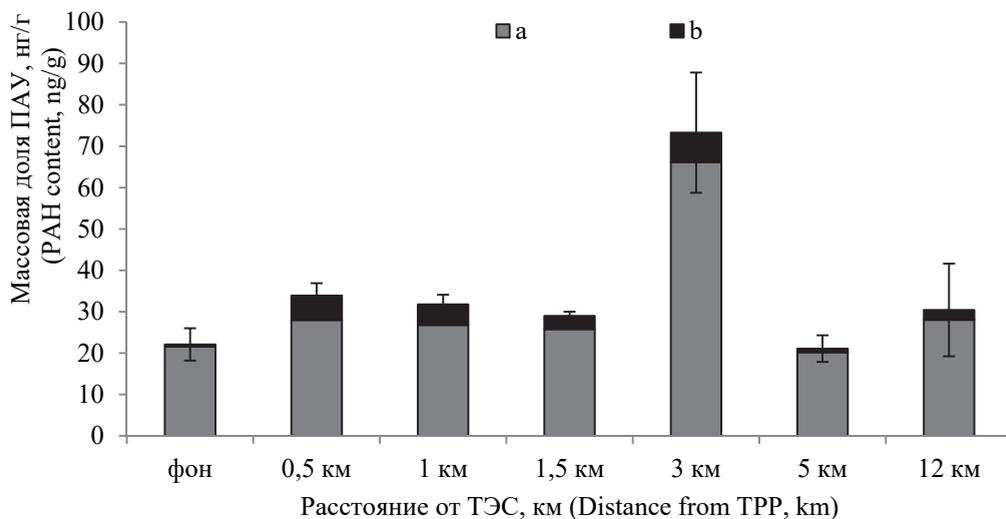


Рис. 2. Содержание ПАУ на поверхности *Pleurozium schreberi*, нг/г:
 а – Σ легкие ПАУ; б – Σ тяжелые ПАУ
[Figure 2. PAH content on the surface of *Pleurozium schreberi*, ng/g:
 а – Σ light PAH; б – Σ heavy PAH]

Суммарное содержание полиаренов на поверхности мхов примерно одинаково на фоновом и загрязненных участках, что свидетельствует о поддержании мхом определенных концентраций полиаренов на поверхности.

Исключением является участок на расстоянии в 3 км, где отмечено резкое повышение массовой доли поверхностных ПАУ – в 3 раза относительно других участков. Такое повышение обусловлено резким возрастанием массовой доли 4–5-ядерных полиаренов: флуорантена, пирена, бенз[а]антрацена, хризена, бензо[б]флуорантена, бензо[к]флуорантена, бенз[а]пирена. Можно предположить, что данные структуры перемещаются на пылевых частицах и выпадают на расстоянии в 3 км. Из-за повышенного содержания 4–5-ядерных структур на поверхности затрудняется их проникновение в ткани растений.

Сравнение уровня накопления ПАУ на поверхности и в тканях *Pleurozium schreberi* позволило выявить, что на фоновом участке и максимально приближенном к нему по содержанию ПАУ в 12 км от ТЭС доля поверхностного накопления составила 17–18 % (рис. 3). На участках, подверженных загрязнению от ТЭС (0,5; 1; 1,5; 5 км) – 5–6 %. То есть в условиях загрязнения активизировались процессы биоаккумуляции ПАУ, и полиарены с поверхности мха активно транспортировались внутрь растения. Исключением являлся участок в 3 км от ТЭС, где доля поверхностного накопления достигала 13 % при максимальном загрязнении. Возможно, в данном случае у *Pleurozium schreberi* включались защитные механизмы, связанные с резким увеличением поступления в фитоценоз 4–5-ядерных структур, главным образом флуорантена, хризена, бензо[б]флуорантена и бензо[к]флуорантена, для которых отмечено повышение не только поверхностного, но и общего содержания в растениях. Как результат, поступление ПАУ внутрь мха снижалось и полиарены в значительной степени концентрировались на поверхности мха.

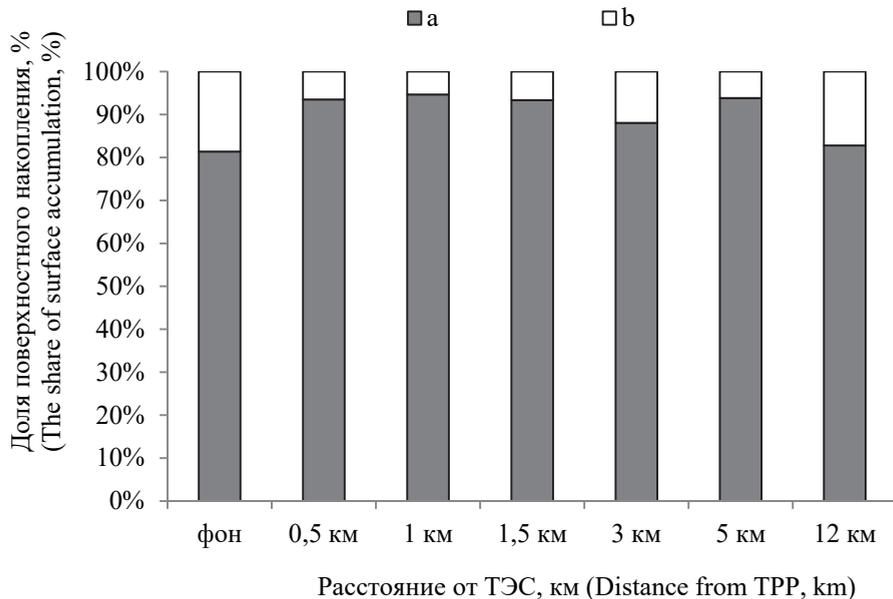


Рис. 3. Вклад поверхностного накопления в общее содержание ПАУ в *Pleurozium schreberi*, %:
 a – содержание ПАУ в тканях; b – содержание ПАУ на поверхности
[Figure 3. The contribution of surface accumulation to the total PAH content in *Pleurozium schreberi*, %:
 a – PAH content in tissues; b – PAH content on the surface]

Сравнение накопления ПАУ в живой и отмершей части мха показало, что различия между ними незначимы на фоновом участке, где полиарены

преимущественно концентрировались в активной живой части, и на большинстве расстояний в условиях загрязнения, где преобладало накопление ПАУ в отмершей части *Pleurozium schreberi* (рис. 4). Значимые превышения содержания ПАУ в отмершей части мха характерны лишь для расстояния в 3 км, характеризующегося максимальным поступлением полиаренов. Таким образом, пик накопления ПАУ в живой части мха наблюдали в 1 км от ТЭС, а пик накопления в отмершей части – в 3 км. Такой факт позволяет предположить, что для правильной идентификации пиков поступления полиаренов необходимо использовать отмершую часть *Pleurozium schreberi* или мох в целом.

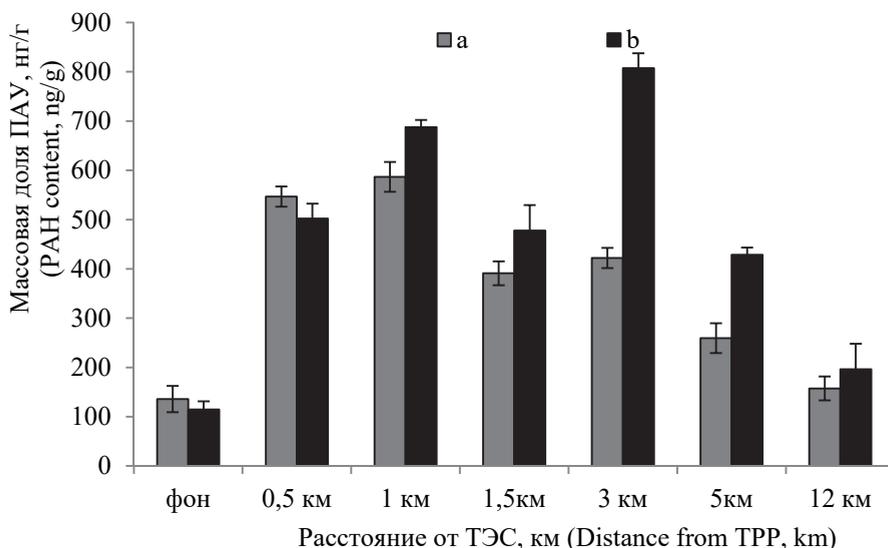


Рис. 4. Содержание ПАУ в живой и отмершей частях *Pleurozium schreberi*, нг/г:
 а – живая часть; б – отмершая часть

[Figure 4. PAH content in the living and dead parts of the *Pleurozium schreberi*, ng/g:
 a – living part, b – dead part]

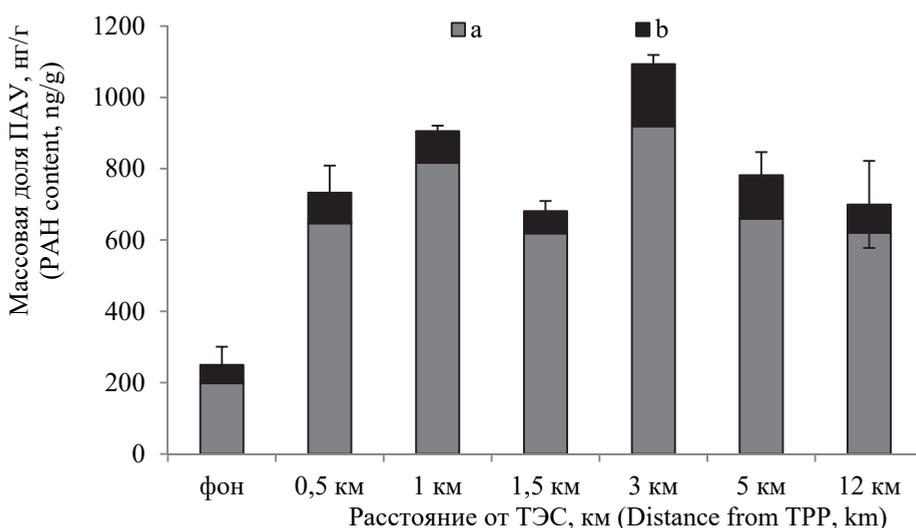


Рис. 5. Содержание ПАУ в органогенных горизонтах почв, нг/г:
 а – Σ легкие ПАУ; б – Σ тяжелые ПАУ

[Figure 5. PAH content in organogenic soil horizons, ng/g:
 а – Σ light PAH; б – Σ heavy PAH]

Повышение массовой доли ПАУ во мхах, составляющих основу биомассы тундровых фитоценозов, ведет к возрастанию содержания полиаренов в почвах (рис. 5). В составе органогенных горизонтов почв всех исследованных участков идентифицировано 13 структур ПАУ: нафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз[а]антрацен, бензо[б]флуорантен, бензо[к]флуорантен, бенз[а]пирен, дибенз[а, h]антрацен, бенз[ghi]перилен.

Изменения в содержании полиаренов в органогенных горизонтах почв идентичны изменениям, характерным для *Pleurozium schreberi*. Максимальное содержание как легких, так и тяжелых структур выявлено в 3 км от ТЭС. Такое повышение обусловлено резким возрастанием массовой доли 4–5-ядерных полиаренов: флуорантена, пирена, бенз[а]антрацена, хризена, бензо[б]флуорантена, бензо[к]флуорантена, бенз[а]пирена и 6-ядерного бенз[ghi]перилена – в 2–3 раза по сравнению с другими загрязненными участками. ПАУ поступают в органогенные горизонты почв при отмирании тундровой растительности, поэтому составы ПАУ в почвах и растениях близки между собой. Коэффициенты корреляции составляют $r = 0,85–0,97$ (при $P = 0,95$; $n = 13$). Кратности превышения фоновых значений легких полиаренов в почве составили 3 раза для участков в 0,5; 1,5; 5 и 12 км от источника. На расстоянии в 1 км от ТЭС кратности превышения достигали 4 раз, на расстоянии в 3 км – 5 раз. Для тяжелых ПАУ кратности превышения фоновых значений также максимальны на расстоянии в 3 км и составляют 3 раза, для других участков – до 2 раз. В целом для мхов и почв наблюдались сходные закономерности в аккумуляции полиаренов. При этом изменения в содержании тяжелых ПАУ в органогенных горизонтах почв проявлялись не так явно, как в растениях. Этот факт во многом связан с тем, что источником высокомолекулярных полиаренов в почве могут служить не только антропогенные процессы, но и процессы почвообразования, в растениях же в естественных условиях тяжелые полиарены отсутствуют или представлены в следовых количествах. Так, повышение содержания 6-ядерного бенз[ghi]перилена в условиях загрязнения при его отсутствии в выбросах ТЭС, возможно, обусловлено его образованием в почве в процессе перекомбинации других структур полиаренов или разложения более сложных органических веществ под действием почвенной микробиоты, активизировавшейся в условиях значительного поступления ПАУ в почву. Возможность педогенного происхождения ПАУ – хорошо доказанный факт. Рядом авторов показано, что источниками образования ПАУ в почве служили пентациклические терпены, ароматические структуры, структуры с диеновыми или полиеновыми связями в алифатических углеводородных цепях, липидах [19; 20]. Другими авторами установлено, что аценафтен, флуорен, пирен, дибенз[а, h]антрацен, нафталин и бенз[ghi]перилен имели преимущественно биопедогенное происхождение и синтезировались в восстановительных условиях в сильно обводненных горизонтах коллювиальных почв [21].

Кроме того, не наблюдалось снижения содержания ПАУ в органогенных горизонтах почв на расстоянии в 12 км, что, возможно, связано с более длительной аккумуляцией полиаренов в почве и ее более низкой чувстви-

ностью к изменениям в уровне поступления загрязнителей в тундровые экосистемы. Эти данные подтверждают информацию, полученную ранее, о более высокой чувствительности *Pleurozium schreberi* по сравнению с почвенным покровом [13; 14].

Для оценки сходства в накоплении ПАУ мхами и почвами использовали кластерный анализ. Данные кластерного анализа подтверждают, что на расстоянии в 12 км от ТЭС массовая доля полиаренов во мхах достигает фоновых значений (рис. 6).

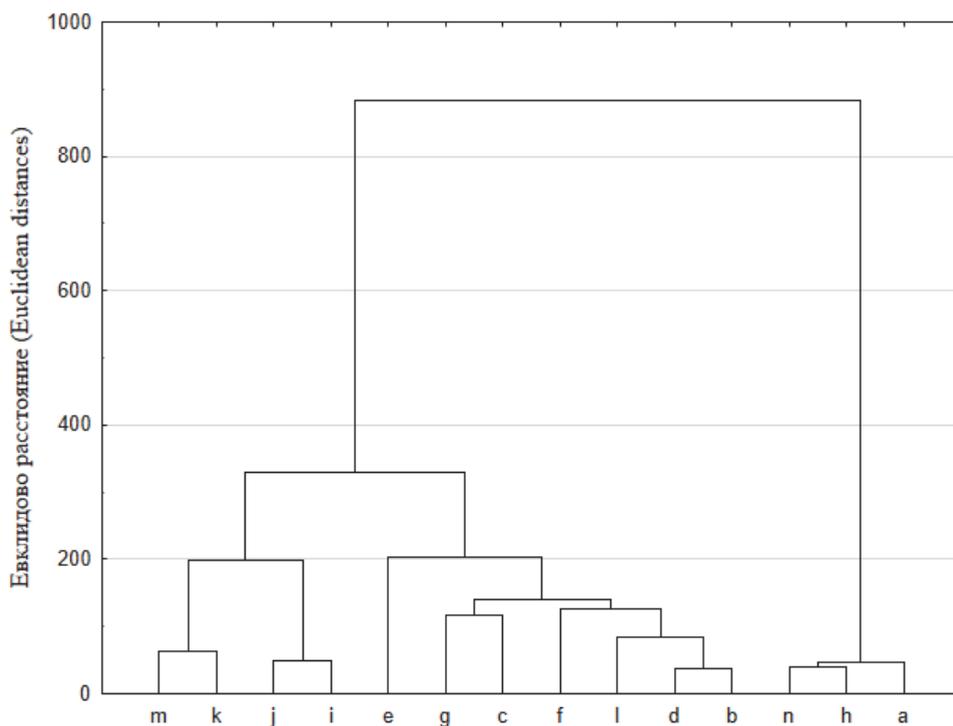


Рис. 6. Диаграмма сходства в накоплении полиаренов *Pleurozium schreberi* и органогенными горизонтами почв, метод Варда:

почва: а – фоновый участок; б – 0,5 км; с – 1 км; д – 1,5 км; е – 3 км; ф – 5 км; г – 12 км;

Pleurozium schreberi: h – фоновый участок; i – 0,5 км; j – 1 км; k – 1,5 км; l – 3 км; m – 5 км; n – 12 км

Figure 6. Similarity diagram in the polyarenes accumulation of *Pleurozium schreberi* and organic soil horizons, the Ward method:

soil: a – background area; b – 0.5 km; c – 1 km; d – 1.5 km; e – 3 km; f – 5 km; g – 12 km;

Pleurozium schreberi: h – background area; i – 0.5 km; j – 1 km; k – 1.5 km; l – 3 km; m – 5 km; n – 12 km]

Содержание ПАУ в *Pleurozium schreberi* и органогенном горизонте почвы фонового участка объединены в один кластер с массовой долей ПАУ во мхе в 12 км от ТЭС. Также в отдельные кластеры выделяются содержание ПАУ в *Pleurozium schreberi* на удалении 0,5; 1; 1,5 и 5 км от ТЭС и концентрация полиаренов органогенных горизонтах почв всех загрязненных участков. К почвенному кластеру присоединяется содержание ПАУ во мхе максимально загрязненного участка, что, вероятно, связано со значительным содержанием полиаренов в растениях на расстоянии в 3 км, в частности 4–5-ядерных структур. В целом содержание полиаренов в почвах и *Pleurozium schreberi* загрязненных участков характеризуется высоким уровнем сходства и значительно отличается от фоновых показателей.

Заключение

На основании полученных данных можно констатировать, что ПАУ в условиях тундры способны перемещаться на значительные расстояния. Приближенные к фоновым значения содержания ПАУ в *Pleurozium schreberi* выявлены лишь на расстоянии в 12 км от ТЭС, для органогенных горизонтов почв значения близкие к фоновым не выявлены.

Подтверждены данные о большей чувствительности *Pleurozium schreberi* к изменениям в уровне загрязнения тундровых биоценозов по сравнению с органогенными горизонтами почв. Отмечено снижение доли накопления ПАУ на поверхности мха с ростом уровня загрязнения по сравнению с фоновым участком. При повышении уровня загрязнения биоаккумуляция ПАУ мхом интенсифицируется. При максимальном загрязнении доля поверхностного накопления несколько возростала, не достигая фоновых значений, что может быть объяснено включением защитных механизмов растения под влиянием активного поступления 4–5 ПАУ в фитоценоз.

На поверхности мха не выявлено присутствие нафталина, что, возможно, связано с его активным поглощением с поверхности из-за сродства с природными компонентами растений.

В целях мониторинга рекомендуется использовать мох *Pleurozium schreberi* в целом или его отмершую часть, что позволит более точно идентифицировать пики накопления полиаренов в тундровых экосистемах.

Участие авторов. Е.В. Яковлева – концепция и дизайн исследования, отбор проб, проведение химического анализа, анализ полученных данных, написание текста. Д.Н. Габов – отбор проб, проведение химического анализа, редакция текста.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60195 (№ ЦИТиС АААА-А18-118062090029-0) и госбюджетной темы № АААА-А17-117122290011-5.

Список литературы

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Сушкова С.Н., Минкина Т.М., Манджиева С.С., Тюрина И.Г., Васильева Г.К., Кузилкая Р. Мониторинг содержания бенз(а)пирена в почвах под влиянием многолетнего техногенного загрязнения // Почвоведение. 2017. № 1. С. 1–12.
- [5] 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.

- [6] *Doegowska S., Migaszewski Z.M.* PAH concentration sin 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. Pp. 1636–1644.
- [7] *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. Pp. 1464–1473.
- [8] *Тюрина И.Г., Сушкова С.Н., Минкина Т.М., Назаренко О.Г., Манджиева С.С., Байэр Т.В.* Содержание бенз(а)пирена в естественной травянистой растительности зоны влияния Новочеркасской ГРЭС // *Плодородие*. 2015. № 6. С. 46–48.
- [9] *Radic S., Meduni G., Kuhari Z., Roje V., Maldini K., Vujcic V., Krivohlavek A.* The effect of hazardous pollutants from coal combustion activity: phytotoxicity assessment of aqueous soil extracts // *Chemosphere*. 2018. Vol. 199. Pp. 191–200.
- [10] *Khaustov A.P., Redina M.M.* Indicator Ratios of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons for Geoenvironmental Studies of Natural and Technogenic Objects // *Water Resources*. 2017. Vol. 44. No. 7. Pp. 903–913.
- [11] *Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Безносиков В.А.* Накопление полициклических ароматических углеводородов растениями южной тундры при добыче угля открытым способом // *Вестник Института биологии*. 2016. № 4. С. 24–33.
- [12] *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. No. 2–3. Pp. 203–218.
- [13] *Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Безносиков В.А.* Временные изменения содержания полиаренов в почвах и растениях нижнего яруса южной тундры под воздействием угледобывающей промышленности // *Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2017. Т. 25. № 2. С. 271–293.
- [14] *Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М.* Накопление полициклических ароматических углеводородов в почвах и мхах южной тундры на разных расстояниях от теплоэлектростанции // *Почвоведение*. 2018. № 5 С. 563–572.
- [15] *Горшков А.Г., Михайлова Т.А., Бережная Н.С., Верецагин А.Л.* Накопление полициклических ароматических углеводородов в хвое сосны обыкновенной на территории Прибайкалья // *Лесоведение*. 2008. № 2. С. 21–26.
- [16] *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.
- [17] *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.
- [18] *Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А.* Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 224 с.
- [19] *Орлов Д.С.* Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 325 с.
- [20] *Wilcke W.* Polycyclic aromatic hydracarbons (PAHs) in soil: a review // *J. Plant Nutr. Soil Sci*. 2000. Vol. 163. Pp. 229–248.
- [21] *Atanassova I., Brummer G.W.* Polycyclic aromatic hydrocarbons of anthropogenic and biopedogenic origin in a colluviated hydromorphic soil of Western Europe // *Geoderma*. 2004. Vol. 120. Pp. 27–34.

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 20.10.2019

Дата принятия к печати: 08.11.2019

Для цитирования:

Яковлева Е.В., Габов Д.Н. Дальность распространения полициклических ароматических углеводородов в тундровой зоне под воздействием ТЭС // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2019. Т. 27. № 3. С. 184–198. <http://dx.doi.org/10.22363/2313-2310-2019-27-3-184-198>

Сведения об авторах:

Яковлева Евгения Вячеславовна – кандидат биологических наук, научный сотрудник отдела почвоведения Института биологии, Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук. eLIBRARY SPIN-код: 7916-3710, ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0003-0793-1468>. E-mail: kaleeva@ib.komisc.ru

Габов Дмитрий Николаевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник экоаналитической лаборатории Института биологии, Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук. eLIBRARY SPIN-код: 2777-7762, ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0002-3786-9872>. E-mail: gabov@ib.komisc.ru

Research article

The distribution distance of polycyclic aromatic hydrocarbons in the tundra zone under the impact of thermal power plant

Evgenia V. Yakovleva, Dmitriy N. Gabov

Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
28 *Kommunisticheskaya St, Syktyvkar, 167982, Russian Federation*

Abstract. Being widely distributed in the tundra zone and highly sensible to temporal or spatial changes in composition of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in ecosystems, *Pleurozium schreberi* Brid. can serve a pollution indicator of tundra biocenoses with polyarenes. The purpose of the present study is estimating the PAH distribution distance in the tundra zone under the impact of thermal power plant (TPP). The study was conducted in the Bolshezemelskaya tundra area of the Vorkuta region (Komi Republic, Russia). The surface accumulation and total content of PAHs in *Pleurozium schreberi* and organic horizon of tundra surface-gley soils (Stagnic Cambisols) at the background site and sites removed from the TPP at 0.5; 1; 1.5; 3; 5 and 12 km were studied. The PAH content in *Pleurozium schreberi* under the impact of TPP changes with distance not linearly. The maximum accumulation was noted at 3 km distance, then the content of PAHs decreased and reached a background level of 12 km from the source. The high molecular weight structures seemed to be transported at distance of no more than 3 km and fell down to the moss surface. The light structures could fly further. This fact responded for concentration of heavy and light structures on particles with different diameter. The moss surface at the background and polluted sites did not contain naphthalene. The total polyarene capacity on the moss surface is relatively the same for the background and polluted sites. At 3 km site, there was a sharp increase in the mass fraction of surface PAH by a factor of 3 due to an increase in the mass fraction of 4–5 – nuclear polyarenes. Being contaminated, the moss activates the bioaccumulation processes of PAHs and so transports polyarenes from its surface to inner organs. The exclusion is a site at a distance of 3 km where the proportion of surface accumulation increased with maximum pollution, i.e., PAH ingress into moss de-

creased. Determined that the dead part of *Pleurozium schreberi* or the whole plant is to be used for true identification of polyarenes. The changes in polyarene content in organic soil horizons are the same as in *Pleurozium schreberi*. By the obtained data, PAHs in tundra can move at large distances. The background-like PAH values are estimated for the site as 12 km from the pollution source for *Pleurozium schreberi*. The background-like PAH values for organic soil horizons are not estimated. The obtained results agree with the cluster analysis data.

Keywords: *Pleurozium schreberi*, Stagnic Cambisols, polyarenes, bioaccumulation, spread, tundra

Participation of the authors. Evgenia V. Yakovleva – concept and design of the study, sampling, chemical analysis, analysis of the data obtained, writing. Dmitriy N. Gabov – sampling, chemical analysis, text editing.

Acknowledgments This work was partially supported by the RFBR in frames of the scientific project No. 18-05-60195 (No. TSITiS AAAA-A18-118062090029-0) and the state budget theme No. AAAA-A17-117122290011-5.

References

- [1] Demin BN, Graevskii AP, Demeshkin AS, Vlasov SV. Pollution of soil-vegetation complex around Barentsburg Mine by polycyclic aromatic hydrocarbons. *Arktika: Ekol. Ekon.* 2012;3(7):62–73. (In Russ.)
- [2] Li W, Chen B, Ding X. Environment and Reproductive Health in China: Challenges and Opportunities. *Environmental Health Perspectives.* 2012;120(5):A184–A185.
- [3] Hamid N, Syed JH, Junaid M, Zhang G, Malik RN. 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;619–620:165–175.
- [4] Sushkova SN, Minkina TM, Mandzhieva SS, Tyurina IG, Vasil'eva GK, Kızılkaya R. Monitoring of Benzo(a)pyrene Content in Soils Affected by the Long-Term Technogenic Contamination. *Eurasian Soil Science.* 2017;50(1):95–105.
- [5] Ribeiro J, Silva TF, Mendonca Filho JG, Flores D. Fly ash from coal combustion – an environmental source of organic compounds. *Applied Geochemistry.* 2014;44:103–110.
- [6] Doegowska S, Migaszewski ZM. PAH concentration sin 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;74:1636–1644.
- [7] Migaszewski ZM, Galuszka A, Crock JG, Lamothe PJ, 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;43:1464–1473.
- [8] Tyurina IG, Sushkova SN, Minkina TM, Nazarenko OG, Mandzhieva SS, Bauer TV, Gimp AV. Benzo(a)pyrene content in natural grassy vegetation in the affected zone of the Novocherkassk power station. *Plodородie.* 2015;6:46–48. (In Russ.)
- [9] Radic S, Meduni G, Kuhari Z, Roje V, Maldini K, Vujcic V, Krivohlavek A. The effect of hazardous pollutants from coal combustion activity: Phytotoxicity assessment of aqueous soil extracts. *Chemosphere.* 2018;199:191–200.
- [10] Khaustov AP, Redina MM. Indicator Ratios of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons for Geoenvironmental Studies of Natural and Technogenic Objects. *Water Resources.* 2017; 44(7):903–913.
- [11] Yakovleva EV, Gabov DN, Beznosikov VA. Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in plants of the tundra zone at open coal mine. *Vestnik instituta biologii Komi nauchnogo centra UroRAN.* 2016;4:24–33. (In Russ.)

- [12] Yakovleva EV, Gabov DN, Beznosikov VA, Kondratenok BM, Dubrovskiy YA. Accumulation of PAHs in Tundra Plants and Soils under the Influence of Coal Mining. *Polycyclic Aromatic Compounds*. 2017;37(2–3):203–218.
- [13] Yakovleva EV, Gabov DN, Beznosikov VA. Temporary changes in polyarenes content in soils and plants under the influence of coal mining. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2017;25(2):271–293.
- [14] Yakovleva EV, Gabov DN, Beznosikov VA, Kondratenok BM. Accumulation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils and Mosses of Southern Tundra at Different Distances from the Thermal Power Plant. *Eurasian Soil Science*. 2018;51(5):528–535.
- [15] Gorshkov G, Mikhailova TA, Berezhnaya NS, Vereshchagin AL. Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in needles of Scots pine in Cis-Baikal region. *Lesovedenie*. 2008;2:21–26. (In Russ.)
- [16] 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;14:1179–1188.
- [17] Verma SK, Masto RE, Gautam S, Choudhury DP, Ram LC, Maiti SK, Maity S. Investigations on PAHs and trace elements in coal and its combustion residues from a power plant. *Fuel*. 2015;162:138–147.
- [18] Rovinsky FY, Teplitskaya TA, Alexeeva TA. *Monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons*. Leningrad, Hydrometeoizdat Publ.; 1988. (In Russ.)
- [19] Orlov DS. *Gumusovye kisloty pochv i obshhaya teoriya gumifikatsii*. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta; 1990. (In Russ.)
- [20] Wilcke W. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil: a review. *J. Plant Nutr. Soil Sci*. 2000;163:229–248.
- [21] Atanassova I, Brummer GW. Polycyclic aromatic hydrocarbons of anthropogenic and biopedogenic origin in a colluviated hydromorphic soil of Western Europe. *Geoderma*. 2004;120:27–34.

Article history:

Received: 20.10.2019

Revised: 08.11.2019

For citation:

Yakovleva EV, Gabov DN. The distribution distance of polycyclic aromatic hydrocarbons in the tundra zone under the impact of thermal power plant. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2019;27(3):184–198. <http://dx.doi.org/10.22363/2313-2310-2019-27-3-184-198>

Bio notes:

Evgenia V. Yakovleva – Candidate of Biological Sciences, researcher of the Department of Soil Science of the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. eLIBRARY SPIN-code: 7916-3710, ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0003-0793-1468>. E-mail: kaleeva@ib.komisc.ru

Dmitriy N. Gabov – Ph.D., senior researcher of the Eco-Analytical Laboratory of the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. eLIBRARY SPIN-code: 2777-7762, ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0002-3786-9872>. E-mail: gabov@ib.komisc.ru