

Аккумуляция полиаренов в высших растениях бугристых болот южной и северной тундры

© 2023. Е. В. Яковлева, к. б. н., н. с., Д. Н. Габов, к. б. н., с. н. с.,
Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: kaleeva@ib.komisc.ru

Проведены исследования содержания полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в высших растениях фоновых бугристых болот южной и северной тундры. Выявлено доминирование лёгких полиаренов в составе ПАУ всех исследованных растений. Установлено, что наибольшим содержанием ПАУ отличались растения южной тундры в 28 км к северо-западу от п. Воргашор, наименьшим – северной тундры в 100 км к северо-западу от данного посёлка. В болотных растениях южной тундры было выявлено повышенное содержание 2–3-ядерных полиаренов, обусловленное дальним переносом от Воркутинской промышленной агломерации. В растениях болот побережья Баренцева моря обнаружено повышение массовой доли тяжёлых ПАУ биопедогенного происхождения, которые аккумулировались растениями из болотных вод. Для осок и пушиц болот выявлено повышенное содержание бенз[к]флуорантена и бенз[а]пирена, связанное с активным корневым поглощением полиаренов, характерным для травянистых растений. Содержание полиаренов в растениях определялось как их видовыми особенностями, так и географическим положением болот. На основании проведённых исследований предложены фоновые концентрации ПАУ в разных видах болотных растений, которые могут быть использованы в целях мониторинга загрязнения ПАУ болотных экосистем севера.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды, южная тундра, северная тундра, растения, бугристые болота.

Accumulation of polyarenes in higher plants of hummock peatlands in the southern and northern tundra

© 2023. E. V. Yakovleva ORCID: 0000-0003-0793-1468, D. N. Gabov ORCID: 0000-0002-3786-9872
Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: kaleeva@ib.komisc.ru

We studied the content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in plants of the background hummock peatlands in the southern (Vorkuta district, Komi Republic) and northern (Nenets Autonomous District) tundra. PAHs in plants were determined by high-performance liquid chromatography. We used ASE-350 Accelerated Solvent Extraction System (Dionex Corporation, USA) to extract PAHs from samples. Totally, 11 individual PAH structures were found in the plant samples studied. Low molecular weight PAHs were prevalent in all studied plants. The highest content of PAHs was found in plants at southern tundra (28 km northwest of the Vorgashor village); the lowest – at site in northern tundra (100 km northwest of the Vorgashor village). In the plants of the southern tundra, an increased content of 2–3-ring polyarenes was detected, that was possibly caused by long-distance transport from the Vorkuta industrial agglomeration. In plants from the Barents Sea coast, we revealed an increase in mass fraction of high molecular PAHs of biopedogenic origin, which were accumulated by plants from the peat waters. For sedges and cotton grasses, an increased content of benz[k]-fluoranthene and benz[a]pyrene has been detected. This fact may be associated with the active root uptake of polyarenes characteristic of herbaceous plants. The results of the cluster analysis showed that the polyarenes content of the plants was determined both by their species composition and by the geographical location of the study sites. The clustering of different plant species from different sites indicates the background concentrations of PAHs, which are maintained by plants under natural conditions without anthropogenic impact. Based on these studies, background concentrations of PAHs in different species of peatland plants have been proposed, which can be used for monitoring PAHs pollution in mire ecosystems of the north.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons, southern tundra, northern tundra, plants, hummock peatlands.

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) – токсичные органические соединения бензольного ряда, которые могут иметь как биогенное, так и антропогенное происхождение. ПАУ принято делить на лёгкие 2–4-ядерные (нафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз[а]антрацен) и тяжёлые 5–6-ядерные (бензо[б]флуорантен, бензо[к]флуорантен, бенз[а]пирен). В настоящее время изучению содержания ПАУ в растениях естественных фоновых местообитаний уделяется недостаточное внимание. Исследования посвящены влиянию разного рода антропогенных источников на накопление ПАУ растениями [1–6]. Документально не установлены фоновые и предельно допустимые концентрации ПАУ в растениях.

Тундровые экосистемы, благодаря своим суровым условиям, являются наименее подверженными антропогенному воздействию. Развитие промышленности, определяющее локальное антропогенное воздействие на тундровые болота, в изучаемом регионе началось в 1930–1940-е гг. Исследования загрязнения ПАУ арктических регионов [7–9] показали, что ПАУ могут переноситься с атмосферными осадками даже в отдалённые районы, но их содержание минимально и соответствует фоновым уровням. Данные факты позволяют считать тундровые болота, удалённые от промышленных объектов, естественными фоновыми участками, а данные по содержанию ПАУ в болотных растениях можно использовать в качестве фоновых значений.

В высоких широтах бугристые болота занимают значительную часть поверхности суши и служат основными резервуарами углерода [10], поэтому являются наиболее интересными объектами для исследования. Основными источниками ПАУ в тундровых болотных растениях могут быть внутриклеточный синтез [11], аккумуляция из болотных вод (так как ПАУ в торфе малодоступны для растений) и атмосферных выпадений [1, 2]. Установлено, что ПАУ пассивно поглощаются растениями вместе с водой и питательными веществами [12].

Целью данной работы было выявить особенности накопления ПАУ в растениях естественных фоновых болот северной и южной тундры и предложить фоновые значения содержания ПАУ в болотных растениях для проведения мониторинговых исследований.

Объекты и методы исследования

Проведены исследования содержания ПАУ в болотных растениях естественных бугристых болот южной и северной тундры. Для каждой зоны растения отбирали на двух участках. Участок южной тундры 1 (ют1) расположен в 4,5 км к югу от оз. Лекъямботы в приозёрной депрессии на водоразделе малых рек Лекъямботывис и Нястишор, координаты: 67°42' с. ш., 63°24' в. д. Участок южной тундры 2 (ют2) расположен в 28 км к СЗ от п. Воргашор, 3,5 км к западу от оз. Лекъямботы, в бассейне р. Лекъямбо-Ты-Вис, координаты: 67°45' с. ш., 63°17' в. д. Участок северной тундры 1 (ст1) находится на побережье Баренцева моря (Ненецкий АО), координаты: 68°35' с. ш., 55°55' в. д. Участок северной тундры 2 локализован в НАО, к востоку от оз. Пуноты, в 100 км к северо-западу от п. Воргашор, его координаты: 68°17' с. ш., 62°23' в. д. С поверхности болот отбирали доминантные виды растений в трёхкратной повторности с участков 1 × 1 м. На участке ют1 отобраны виды: *Sphagnum riparium* Ångstr., *Sphagnum russowii* Warnst., *Eriophorum scheuchzeri* Hoppe, *Rubus chamaemorus* L., *Vaccinium uliginosum* L., *Betula nana* L. На участке ют2: *Sphagnum riparium*, *Eriophorum russeolum* Fries, *Carex aquatilis* L., *Ledum palustre* L., *Rubus chamaemorus*, *Betula nana*. На участке ст1: *Sphagnum lindbergii* Schimp., *Eriophorum russeolum*, *Carex aquatilis*, *Ledum decumbens* (Aiton) Lodd. ex Steud., *Rubus chamaemorus*, *Betula nana*. На участке ст2: *Sphagnum fuscum* (Schimp.) H. Klinggr., *Carex aquatilis*, *Ledum decumbens*, *Rubus chamaemorus*, *Vaccinium uliginosum*, *Betula nana*. У мхов и травянистых растений отбирали наземную и подземную часть, у кустарничков – листья, ветви и корни, у кустарников – листья, ветви, корни и стебли. Результаты усредняли с учётом массы отдельных органов и применяли на целое растение.

Химико-аналитические исследования выполняли в ЦКП «Хроматография» ИБ ФИЦ КНЦ УрО РАН. Определение ПАУ в растениях проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на жидкостном хроматографе «Люмахром». Методика определения ПАУ в растениях описана ранее [4]. Для исследованных выборок с помощью теста Колмогорова-Смирнова установлено нормальное распределение. Статистическую обработку проводили с помощью *t*-критерия Стьюдента при $P = 0,95$. На рисунках 1 и 3 приведены средние значения содержания ПАУ

в растениях, в качестве планок погрешностей использовали стандартные отклонения единичного значения. Для рисунка 1 усреднение проводили по зонам, для рисунка 3 усредняли все полученные данные для каждого вида растения. 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.

Результаты и обсуждение

В растениях болот южной и северной тундры обнаружено 11 структур ПАУ: нафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз[а]антрацен, бензо[б]-флуорантен, бензо[к]флуорантен, бенз[а]-пирен. В растениях доминировали лёгкие 2-4 ядерные ПАУ, их доля от общей суммы ПАУ варьировала от 95 до 99% (рис. 1). Преобладание низкомолекулярных структур ПАУ в растениях было отмечено многими авторами [3, 13–15]. Как правило, отсутствие 5- и 6-кольцевых ПАУ в растительном покрове указывает на отсутствие каких-либо региональных антропогенных источников выбросов этих соединений [13].

Следует отметить, что содержание ПАУ в растениях одного рода на всех исследуемых участках южной и северной тундры было близким. Для большинства растений, за исключением мхов родов *Sphagnum*, *Eriophorum* и *Carex aquatilis* различия в накоплении тяжёлых 5–6 ядерных структур для разных зон не значимы. Также минимальными были различия между накоплением ПАУ растениями разных видов одного рода.

Для рода *Sphagnum*, представленного в нашем исследовании несколькими видами, выявлены максимальные различия в накоплении ПАУ. При этом между *Sphagnum riparium* на разных участках северной тундры значимых различий в накоплении индивидуальных структур выявлено не было. Вероятно, разница в накоплении ПАУ для исследованных мхов во многом связана с видовыми особенностями. На накопление полиаренов могло влиять местообитание мхов: *S. fuscum* предпочитает олиготрофные местообитания [16], поэтому накопление ПАУ в нём было минимальным из всех представленных видов. *S. russowii* также является олиготрофом [17], но накопление ПАУ в нём было максимально. Такой факт мог быть обусловлен тем, что в олиготрофных условиях основным источником ПАУ для мхов служило атмосферное поступление, ко-

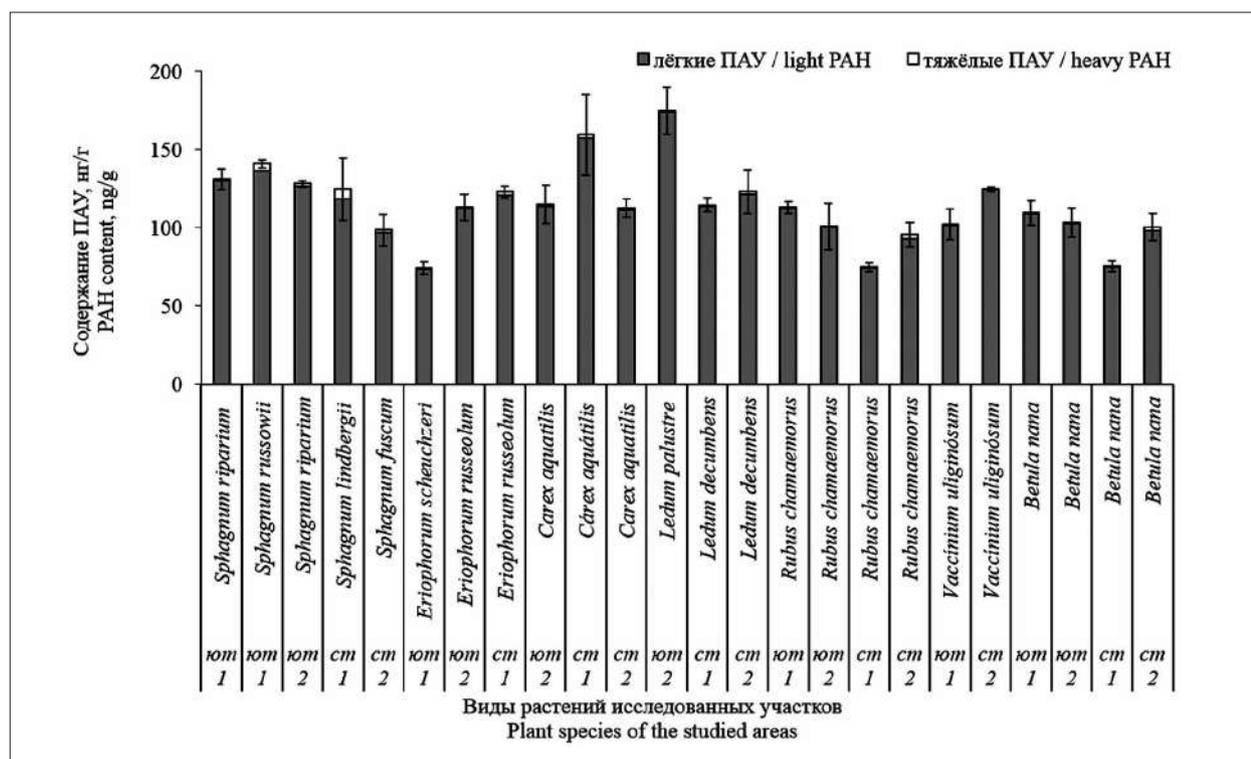


Рис. 1. Содержание ПАУ в болотных растениях южной и северной тундры (нг/г), где ют – южная тундра, ст – северная тундра, 1, 2 – номер участка
 Fig. 1. PAH content in bog plants of the southern and northern tundra (ng/g), where ют – southern tundra, ст – northern tundra, 1, 2 – site number

торое было больше в условиях южной тундры, наиболее приближённой к промышленным объектам, по сравнению с северной тундрой. Во мхах болот южной тундры выявлено повышенное содержание лёгких летучих ПАУ нафталина и фенантрена, по сравнению с северной. Мхи *Sphagnum riparium* и *S. lindbergii*, произрастающие во влажных условиях, могли активно поглощать ПАУ из болотных вод, что приводило к их сходному накоплению, для большинства индивидуальных структур различия в накоплении ПАУ данными видами в разных зонах были не значимы.

Для видов рода *Eriophorum* также можно проследить разные особенности накопления ПАУ. Аккумуляция полиаренов *E. russeolum* в южной и северной тундре происходила сходным образом, различия в накоплении были выявлены только для тяжёлых структур, которые активно накапливались растениями северной тундры (ст1). Повышенное накопление тяжёлых ПАУ было характерно и для *S. lindbergii* данного участка. Оно могло быть связано с особенностями расположения участка на побережье Баренцева моря. Ранее нами было выявлено повышенное содержание 5–6 ядерных ПАУ в верхних горизонтах торфяников побережья Баренцева моря по сравнению с данными слоями торфяников южной тундры [15]. *Eriophorum scheuchzeri* отличалась низким накоплением ПАУ, по-видимому, в силу видовых особенностей. Содержание индивидуальных ПАУ в ней значимо отличалось от *E. russeolum* северной тундры. Для двух участков южной тундры различия выявлены лишь для лёгких структур нафталина и флуорена, которых было несколько больше на участке ют2.

Образцы *Carex aquatilis* были отобраны на участках болот южной и северной тундры. Для большинства полиаренов различия в накоплении ПАУ в разных зонах были незначимы. Для осок болота побережья Баренцева моря выявлены значимые превышения содержания фенантрена, бенз[а]антрацена, бенз[к]-флуорантена и бенз[а]пирена по сравнению с участком южной тундры. Повышенные содержания тяжёлых ПАУ также были выявлены для *Eriophorum* и *Sphagnum*.

На болотах южной тундры был проанализирован *Ledum palustre*, на участках северной тундры – *L. decumbens*. Различия в накоплении индивидуальных полиаренов *L. palustre* и *L. decumbens* выявлены лишь для лёгких структур нафталина, флуорена и антрацена. Данный факт может быть связан с видовыми

особенностями *L. palustre*, характеризующегося большей способностью к аккумуляции ПАУ. Морфологически *L. decumbens* отличается от *L. palustre* очень узкими листьями и стелющимся расположением побегов, что могло ограничивать атмосферную аккумуляцию ПАУ. Кроме того, на накопление ПАУ могло повлиять расположение участков.

Rubus chamaemorus была отобрана на всех исследуемых участках, но при этом сходные закономерности накопления ПАУ в растениях данного вида выявлены лишь для флуорена, пирена, хризена и 5–6 ядерных структур. Растения участков южной тундры отличались повышенным содержанием нафталина и фенантрена. *Rubus chamaemorus* побережья Баренцева моря (ст1) содержала значительные количества флуорантена по сравнению с другими участками.

Также для всех исследованных участков было проанализировано содержание ПАУ в *Betula nana*. Значимые различия между кустарниками разных участков выявлены только для нафталина, хризена и бенз[а]антрацена. Для южной тундры были выявлены повышенные содержания нафталина и хризена. Для участка северной тундры (ст2) бенз[а]-антрацена.

Кустарнички *Vaccinium uliginosum* были отобраны только на участках ют1 и ст2. В целом аккумуляция ПАУ кустарничком в разных зонах была сходной, различия для большинства индивидуальных ПАУ не значимы. В южной тундре отмечены повышенные концентрации фенантрена (25 нг/г ют1, против 16 нг/г ст2), в северной – нафталина (95 нг/г для ст2 против 58 нг/г ют1) и бенз[а]-антрацена (0,3 нг/г для ст2 против 0 нг/г ют1). Так как для других болотных растений зоны северной тундры не характерны высокие концентрации нафталина, значительное накопление его в ветвях *V. uliginosum*, которыми определялся прирост нафталина, могло быть обусловлено аккумуляцией в течение длительного времени. Так как продолжительность жизни *V. uliginosum* до 90 лет, в южной тундре, вероятно, были отобраны более молодые растения, аккумуляция нафталина в которых происходила более короткое время.

Для *Carex aquatilis* и *Eriophorum* sp. выявлено повышенное содержание бенз[к]-флуорантена и бенз[а]пирена. Это может быть связано с активным корневым поглощением полиаренов характерным для травянистых растений [1, 2, 18]. Особенно накопление данных полиаренов характерно для участка

побережья Баренцева моря. Ранее в верхних слоях торфа исследованных участков побережья Баренцева моря были выявлены повышенные содержания бенз[к]флуорантена и бенз[а]пирена, которые могли поглощаться травянистыми растениями из болотных вод. Тяжёлые ПАУ в торфе участка ст1 имели биопедогенное происхождение, и образовывались в процессе поликонденсации молекул лигнина и деструкции гуминовых кислот и других высокомолекулярных органических соединений торфа [15, 19].

Выявлена тенденция более высокого содержания нафталина и фенантрена в растениях южной тундры по сравнению с северной, что, вероятно, связано с близостью промышленных объектов. В южной тундре более вероятно атмосферное поступление лёгких ПАУ от Воркутинского промышленного кластера находящиеся в 20 (ют1) и 30 км (ют2) от исследованных участков в южной тундре и в 100 км (ст2) и более (ст1) в северной тундре. Исследования льда и снежного покрова Баренцева моря установили отсутствие аэротехногенного привноса ПАУ на данной территории [7]. Согласно ранее полученным данным пик накопления ПАУ в почвах и растениях в зоне действия уголь-

ной шахты Воркутинская приходился на расстояние 500 м, в зоне действия Воркутинской ТЭС 1000 м [3, 4]. Данные подтверждаются и другими авторами – показано, что суммарное содержание ПАУ в почвах на расстоянии около 1000 м от предприятий электростанций снижались в 2 раза, наибольшей дальностью распространения характеризовались 2–3 ядерные ПАУ [5, 6]. Повышение массовой доли данных полиаренов мы наблюдали в ряде растений участков южной тундры. Установлено, что загрязнению тяжёлыми ПАУ (бенз[а]-пиреном) наиболее подвержены почвы и травянистые растения 5 км зоны на северо-запад от государственной районной электростанции, перемещение на дальние расстояния данного соединения не выявлено [1, 2], что также подтверждает полученные нами данные. В целом более высоким усреднённым содержанием полиаренов отличаются растения южной тундры участка 2, наименьшим – растения северной тундры участка 2.

Кластерный анализ не показал однозначных результатов (рис. 2), растения группировались как по принадлежности к одному участку отбора, как *Betula nana* и *Rubus chamaemorus*, *Ledum decumbens* и *Sphagnum*

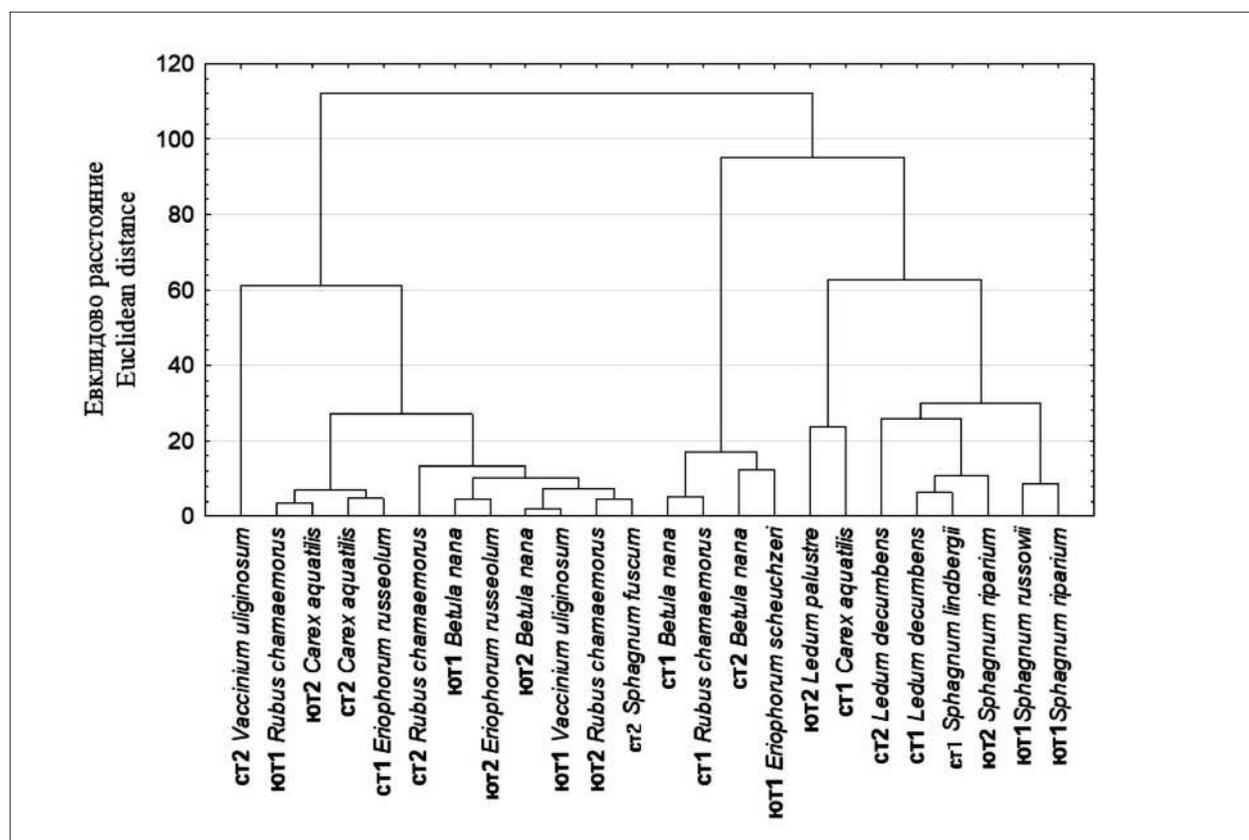


Рис. 2. Кластерный анализ содержания ПАУ в растениях разных зон
 Fig. 2. Cluster analysis of PAH content in plants from different zones

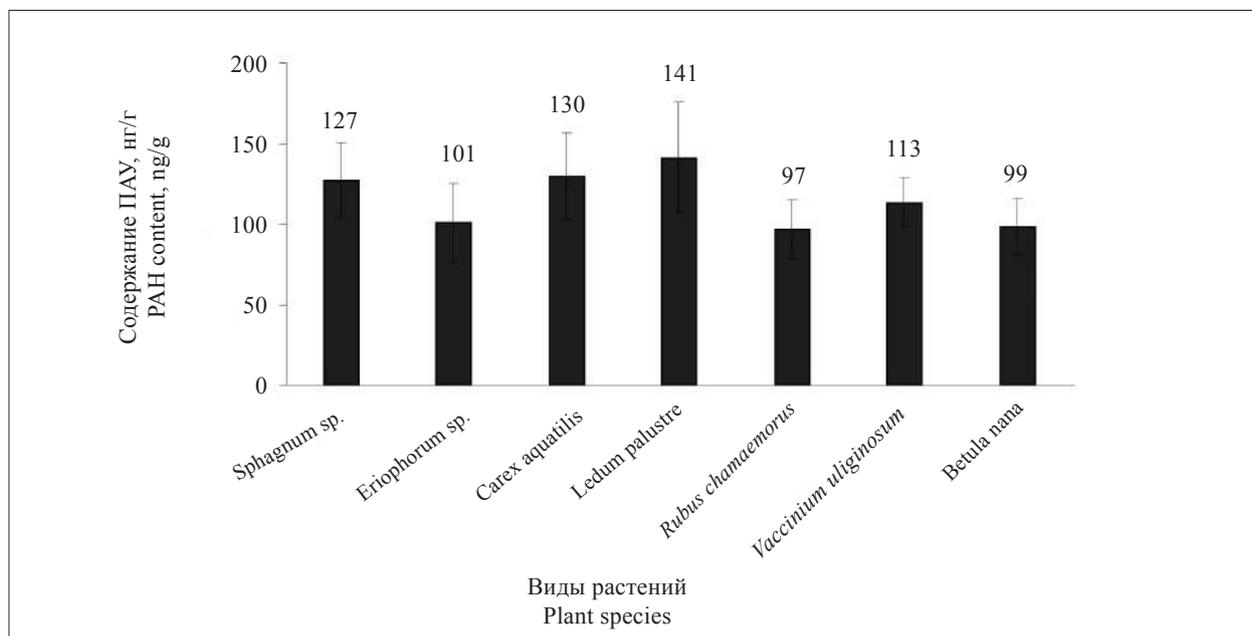


Рис. 3. Усреднённые значения содержания ПАУ в болотных растениях, нг/г
 Fig. 3. Average values of PAH content in bog plants, ng/g

lindbergii участка ст1; *Betula nana*, *Rubus chamaemorus*, *Eriophorum russeolum*, *Carex aquatilis* участка ют2; так и по схожести закономерностей накопления ПАУ растениями разных зон. В отдельную группу выделились мхи участков ют1, ют2 и ст1. Сходная аккумуляция характерна для видов рода *Ledum* разных участков. Растения *R. chamaemorus* участков ют 1, ют 2 и ст 2 также были объединены в один кластер.

Объединение в один кластер растений одного вида с разных участков также свидетельствует о существовании фоновых концентраций ПАУ, которые поддерживаются растениями в естественных условиях в отсутствии источников антропогенного воздействия.

К настоящему времени не существует аттестованной методики определения ПАУ в растениях. Для методики определения ПАУ в почве ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.62-09 в исследованном нами диапазоне концентраций установлены погрешности около 50%. Растения являются более сложным объектом для анализа, поэтому погрешность определения для них не может быть значительно ниже. В нашем случае стандартное отклонение единичного значения при усреднении данных всех исследованных участков для каждого из исследованных видов растений не превышает 24% от среднего значения (рис. 3).

Исходя из этого, мы предполагаем, что для целей мониторинга можно усреднить по-

лученные нами данные по содержанию ПАУ для каждого из исследованных видов растений и использовать полученные значения в качестве фоновых для перечисленных видов растений других тундровых болот.

Заключение

Исследования накопления полиаренов растениями тундровых болот, в том числе с использованием статистических методов, показали, что аккумуляция ПАУ растениями определяется как видовыми особенностями, так и географическим (зональным) расположением участков произрастания. Обнаружено повышенное содержание лёгких 2–3-ядерных структур ПАУ в растениях болот южной тундры, что может быть обусловлено дальним переносом от Воркутинской промышленной агломерации. В целом состав ПАУ исследованных растений близок, отклонения в содержании для растений одного рода на разных исследованных участках не значимы. На основании проведённых исследований предложены усреднённые фоновые значения суммарного содержания ПАУ в болотных растениях разных видов, которые могут быть использованы в целях мониторинга загрязнения окружающей среды ПАУ.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственной темы № 122040600023-8.

Литература

1. Sushkova S.N., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Tyurina I.G., Vasil'eva G.K., Kizilkaya R. Monitoring of benzo[a]pyrene content in soils affected by the long-term technogenic contamination // Eurasian Soil Science. 2017. V. 50. No. 1. P. 95–105.

2. Тюрина И.Г., Сушкова С.Н., Минкина Т.М., Назаренко О.Г., Манджиева С.С., Бауэр Т.В. Содержание бенз[а]пирена в естественной травянистой растительности зоны влияния Новочеркасской ГРЭС // Плодородие. 2015. № 6. С. 46–48.

3. Яковлева Е.В., Габов Д.Н. Накопление полиаренов в почвах и растениях южной тундры под действием процессов добычи и сжигания угля // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 2. С. 70–76.

4. Yakovleva E.V., Gabov D.N. Polyarenes accumulation in tundra ecosystem influenced by coal industry of Vorkuta // Polish Polar Research. 2020. V. 41. No. 3. P. 237–267.

5. 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. V. 199. P. 191–200.

6. Cheng Q., Ge W., Chai C., Wu J., Ma D., Zeng L., Zhu X., Chen Q., Li J. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soil around coal-fired power plants in Shandong, China // Pol. J. Environ. Stud. 2019. V. 28. No. 1. P. 53–64.

7. Nemirovskaya I.A., Novigatskii A.N. Hydrocarbons in the snow and ice cover and waters of the Arctic Ocean // Geochemistry International. 2003. V. 41. No. 6. P. 585–594.

8. AMAP Assessment 2016: Chemicals of Emerging Arctic Concern. Oslo, Norway: Narayana Press, Gylling, 2017. 354 p.

9. Masclet P., Hoyau V., Jaffrezo J.L., Cachier H. Polycyclic aromatic hydrocarbon deposition on the ice sheet of Greenland. Part I: Superficial snow // Atmospheric Environment. 2000. V. 34. No. 19. P. 3195–3207.

10. Пастухов А.В., Кноблаух К., Яковлева Е.В., Каверин Д.А. Маркеры трансформации органического вещества в мерзлотных бугристых болотах на европейском северо-востоке // Почвоведение. 2018. № 1. С. 48–61.

11. Krauss M., Wileke W., Martius Ch., Bandeira A.G., Garcia M.V.B., Amelung W. Atmospheric versus biological sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a tropical rain forest environment // Environ. Poll. 2005. V. 135. No. 1. P. 143–154.

12. Gao Y., Zhang Y., Liu J., Kong H. Metabolism and subcellular distribution of anthracene in tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) // Plant Soil. 2013. V. 365. P. 171–182.

13. Malawska M., Ekonomiuk A. The use of wetlands for the monitoring of non-point source air pollution // Polish Journal of Environmental Studies. 2008. V. 17. P. 57–70.

14. Wang Z., Li H., Liu S. Different distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) between Sphagnum and Ledum peat from an ombrotrophic bog in Northeast China // Journal of Soils and Sediments. 2019. V. 19. P. 1735–1744.

15. Yakovleva E.V., Gabov D.N., Vasilevich R.S. Formation of the composition of polycyclic aromatic hydrocarbons in hummocky bogs in the forest tundra–northern tundra zonal sequence // Eurasian Soil Science. 2022. V. 55. No. 3. P. 313–329.

16. Гришуткин О.Г., Бойчук М.А., Гришуткина Г.А., Рукавишников В.В. Видовой состав и экология сфагновых мхов (Sphagnaceae) Республики Мордовия (Россия) // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2020. Т. 5. № 3. С. 114–133.

17. Зверев А.А., Бабешина Л.Г. Оценка условий местообитаний сфагновых мхов Западно-Сибирской равнины по ведущим экологическим факторам: объекты, материалы и методические основы // Вестник Томского государственного университета. 2009. № 325. С. 167–173.

18. Tian K., Bao H., Liu X., Wu F. Accumulation and distribution of PAHs in winter wheat from areas influenced by coal combustion in China // Environmental Science and Pollution Research. 2018. V. 25. P. 23780–23790.

19. Atanassova I., Brummer G.W. Polycyclic aromatic hydrocarbons of anthropogenic and biopedogenic origin in a colluviated hydromorphic soil of Western Europe // Geoderma. 2004. V. 120. P. 27–34.

References

1. Sushkova S.N., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Tyurina I.G., Vasil'eva G.K., Kizilkaya R. Monitoring of benzo[a]pyrene content in soils affected by the long-term technogenic contamination // Eurasian Soil Science. 2017. V. 50. No. 1. P. 95–105. doi: 10.1134/S1064229317010148

2. Tyurina I.G., Sushkova S.N., Minkina T.M., Nazarenko O.G., Mandzhieva S.S., Bauer T.V., Gimp A.V. Benzo[a]pyrene content in natural grassy vegetation in the affected zone of the novoчеркасск power station // Plodorodie. 2015. No. 6. P. 46–48 (in Russian).

3. Yakovleva E.V., Gabov D.N. Accumulation of polyarenes in soils and plants of the south tundra zone affected by coal mining and thermal power plant // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 2. P. 70–76 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-070-076

4. Yakovleva E.V., Gabov D.N. Polyarenes accumulation in tundra ecosystem influenced by coal industry of Vorkuta // Polish Polar Research. 2020. V. 41. No. 3. P. 237–267. doi: 10.24425/ppr.2020.134122

5. 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. V. 199. P. 191–200. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.02.008

6. Cheng Q., Ge W., Chai C., Wu J., Ma D., Zeng L., Zhu X., Chen Q., Li J. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soil around coal-fired power plants in Shandong, China // *Pol. J. Environ. Stud.* 2019. V. 28. No. 1. P. 53–64. doi: 10.15244/pjoes/81686
7. Nemirovskaya I.A., Novigatskii A.N. Hydrocarbons in the snow and ice cover and waters of the Arctic Ocean // *Geochemistry International.* 2003. V. 41. No. 6. P. 585–594.
8. AMAP Assessment 2016: Chemicals of Emerging Arctic Concern. Oslo, Norway: Narayana Press, Gylling, 2017. 354 p.
9. Masclet P., Hoyau V., Jaffrezo J.L., Cachier H. Polycyclic aromatic hydrocarbon deposition on the ice sheet of Greenland. Part I: Superficial snow // *Atmospheric Environment.* 2000. V. 34. No. 19. P. 3195–3207. doi: 10.1016/S1352-2310(99)00196-x
10. Pastukhov A.V., Knoblauch C., Yakovleva E.V., Kaverin D.A. Markers of soil organic matter transformation in permafrost peat mounds of Northeastern Europe // *Eurasian Soil Science.* 2018. V. 51. No. 1. P. 42–53. doi: 10.7868/S0032180X18010057
11. Krauss M., Wilcke W., Martius Ch., Bandeira A.G., Garcia M.V.B., Amelung W. Atmospheric versus biological sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a tropical rain forest environment // *Environ. Poll.* 2005. V. 135. No. 1. P. 143–154.
12. Gao Y., Zhang Y., Liu J., Kong H. Metabolism and subcellular distribution of anthracene in tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) // *Plant Soil.* 2013. V. 365. P. 171–182. doi: 10.1007/s11104-012-1386-1
13. Malawska M., Ekonomiuk A. The use of wetlands for the monitoring of non-point source air pollution // *Polish Journal of Environmental Studies.* 2008. V. 17. P. 57–70.
14. Wang Z., Li H., Liu S. Different distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) between *Sphagnum* and *Ledum* peat from an ombrotrophic bog in Northeast China // *Journal of Soils and Sediments.* 2019. V. 19. P. 1735–1744. doi: 10.1007/s11368-018-2178-x
15. Yakovleva E.V., Gabov D.N., Vasilevich R.S. Formation of the composition of polycyclic aromatic hydrocarbons in hummocky bogs in the forest tundra – northern tundra zonal sequence // *Eurasian Soil Science.* 2022. V. 55. No. 3. P. 313–329. doi: 10.1134/S1064229322030140
16. Grishutkin O.G., Boychuk M.A., Grishutkina G.A., Rukavishnikova V.V. Check-list and ecology of sphagnum mosses (Sphagnaceae) in the Republic of Mordovia // *Nature Conservation Research.* 2020. V. 5. No. 3. P. 114–133 (in Russian). doi: 10.24189/ncr.2020.038
17. Zverev A.A., Babeshina L.G. The estimate of the conditions of habitats of sphagnum mosses in West Siberian plain by the key environmental factors: objects, data and methodical basis // *Tomsk State University Journal.* 2009. No. 325. P. 167–173 (in Russian).
18. Tian K., Bao H., Liu X., Wu F. Accumulation and distribution of PAHs in winter wheat from areas influenced by coal combustion in China // *Environmental Science and Pollution Research.* 2018. V. 25. P. 23780–23790. doi: 10.1007/s11356-018-2456-6
19. Atanassova I., Brummer G.W. Polycyclic aromatic hydrocarbons of anthropogenic and biopedogenic origin in a colluviated hydromorphic soil of Western Europe // *Geoderma.* 2004. V. 120. P. 27–34. doi: 10.1016/j.geoderma.2003.08.007