

УДК [504.43+504.73]:547.912

ФОРМИРОВАНИЕ СОСТАВА ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ БУГРИСТЫХ БОЛОТ В ЗОНАЛЬНОМ РЯДУ ЛЕСОТУНДРА–СЕВЕРНАЯ ТУНДРА¹

© 2022 г. Е. В. Яковлева^а, *, Д. Н. Габов^а, Р. С. Василевич^а^аИнститут биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, ул. Коммунистическая, 28, Сыктывкар, 167982 Россия

*e-mail: kaleeva@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 30.06.2021 г.

После доработки 06.09.2021 г.

Принята к публикации 29.10.2021 г.

Исследовано накопление полициклических ароматических углеводородов в растениях и торфе болот трех природных подзон: лесотундры, южной тундры и северной тундры. Определение содержания полиаренов проведено методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. Отсутствие статистически значимых различий в накоплении ПАУ растениями одного вида в исследованных экотонах определяет возможность экстраполировать данные по составу ПАУ исследованных растений на другие фоновые бугристые болота. В верхней части профиля состав ПАУ торфа определялся составом ПАУ доминирующей растительности. Выявлены высокие значения коэффициентов корреляции состава ПАУ растений-доминантов ботанического состава и торфа. Постепенное разложение травянистых и древесных остатков, обогащенных лигнином, приводило к новообразованию в торфе тяжелых структур полиаренов, отсутствовавших в составе растений. Коэффициенты корреляции состава ПАУ торфа и растений уменьшались с увеличением глубины и степени разложения торфа. Для всех исследуемых торфяников выявлена тенденция обратной зависимости в накоплении нафталина и бенз[ghi]перилена и уменьшении содержания ПАУ в верхних слоях многолетней мерзлоты. Содержание полиаренов в слоях многолетней мерзлоты определялось историческими особенностями формирования торфяников. В слоях торфяников, сформировавшихся в период климатического оптимума голоцена в условиях избыточного увлажнения, выявлены пиковые значения содержания 5–6-ядерных структур ПАУ, главным образом бенз[ghi]перилена. Для торфяников, сформировавшихся как верховое или переходное болото и возникших в суббореальный период, повышенных концентраций бенз[ghi]перилена не обнаружено. Вероятной причиной уменьшения содержания ПАУ в торфяниках от лесотундры и южной тундры к северной тундре может быть понижение температуры почв при движении с юга на север.

Ключевые слова: болотные растения, торф, полициклические ароматические углеводороды, Fibric Floatic Cryic Histosol, Fibric Folic Cryic Histosol, зональный ряд почв

DOI: 10.31857/S0032180X22030145

ВВЕДЕНИЕ

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) – это канцерогенные и мутагенные органические соединения бензольного ряда [35, 41, 49], которые могут синтезироваться растениями [4, 59]. Растения естественных экосистем характеризуются незначительным накоплением полиаренов, в основном низкомолекулярных [28, 46, 62].

В высоких широтах бугристые болота занимают значительную часть поверхности суши и являются основными резервуарами углерода. Хими-

ческий состав болотных растений к настоящему времени мало исследован. Существует ряд работ по изучению влияния процессов выгорания [56] и различных промышленных объектов на изменение состава ПАУ растений [45]. Показано, что состав ПАУ торфяников может определяться видовым разнообразием болотных растений. Торф, образованный *Sphagnum* и *Ledum*, характеризовался разным составом ПАУ, хотя содержание ПАУ в растениях было подобным. Данный факт авторы объясняют низкой скоростью разложения *Sphagnum* относительно *Ledum* [57].

Принято считать, что основным источником ПАУ является антропогенная деятельность человека [26, 48, 53, 55]. Распределение ПАУ по про-

¹ К статье имеются дополнительные материалы, доступные для авторизированных пользователей по doi: 10.31857/S0032180X22030145.

филю торфяников иногда используют в качестве индикатора исторической деятельности человека [40]. Для торфяников тундровой зоны антропогенный механизм образования ПАУ маловероятен, так как освоение и развитие промышленности в исследуемом регионе началось в 30-е–40-е годы XX в. Согласно данным, полученным при датировании торфяников тундровой зоны, скорость их формирования в последнее тысячелетие была очень низкой 0.06–0.10 мм/год [31]. За 100-летний период мог образоваться слой торфяника до 5 см. И так как миграция ПАУ в торфяниках вследствие их гидрофобности слабо выражена, именно этот слой теоретически мог быть подвержен атмосферному воздействию.

Исследуемые участки находятся на значительном удалении от промышленных предприятий и урбанизированных центров, поэтому современное их влияние на состав ПАУ растений и верхние слои торфяников также ограничено. При этом остается возможность глобального переноса ПАУ, вклад которого позволяет оценить изучение ледяных кернов в отдаленных районах. Так, исследование льда, проведенное в Гренландии в 1991–1994 гг., продемонстрировало, что ПАУ могут поступать с атмосферными осадками даже в столь отдаленные районы. Содержание ПАУ в кернах льда минимально и достигает для флуорантена и пирена от 0.1 до 4.7 нг/г, для тяжелых ПАУ, таких как бенз[*g,h,i*]перилен от 0.05 до 0.18 нг/г [44]. По данным других исследователей максимальное суммарное содержание ПАУ в снежном покрове Гренландии отмечено в приповерхностном слое и составило 1.9 нг/кг [51]. Обзор накопления ПАУ в Арктических регионах показал, что ПАУ в основном накапливаются локально в экосистемах в регионах с развитой промышленностью, но действительно достигают Арктики за счет атмосферного переноса на большие расстояния, при этом их содержание минимально и часто ниже пределов обнаружения [20]. В снежном покрове и ледяных кернах окраинных морей Северного Ледовитого океана – Баренцевом, Карском, Лаптевых и Восточно-Сибирском – средние концентрации ПАУ составляют 5 нг/л, что соответствует их фоновым значениям в шельфовых акваториях. Состав углеводородов снега и льда не выявил влияния антропогенных поступлений [47].

Некоторые авторы объясняют повышенные концентрации 3–6-ядерных ПАУ в активном слое и слоях многолетней мерзлоты торфяников двумя основными факторами – диагенезом (процессами почвообразования) и вулканической деятельностью [40]. О том, что трансформация сложных органических веществ в процессе почвообразования является одним из основных источников образования ПАУ в торфяниках, говорят и другие авторы [43]. Сведения о присутствии вулканической деятельности в регионе нашего исследования

отсутствуют. Более того, исследованный участок значительно удален от действующих (действовавших) вулканов. Таким образом, мы предполагаем, что формирование состава ПАУ тундровых торфяников обусловлено процессами педогенеза.

В работе [27] демонстрируются доказательства того, что лигнин является основным источником органического вещества не пирогенного генезиса в почве, в том числе конденсированных ароматических молекул. В природе наиболее эффективную биodeградацию лигнина осуществляют базидиомицеты, принадлежащие к группе “грибы белой гнили” [15]. Показано, что изменение температурного режима приводит к изменениям в функциональных группах грибов [21, 54]. Грибы, потенциально способные разлагать целлюлозу, доминировали при +4°C, тогда как при температуре +8°C преобладали потенциально разлагающие лигноцеллюлозу грибы. Изменения состава микробиоты могли сказываться на составе ПАУ торфа исследуемых зон, что делает интересным исследование изменения массовой доли ПАУ в торфяниках в зональном ряду [21].

Цель работы – изучить особенности влияния состава ПАУ болотных растений и ботанического состава торфа на содержание полиаренов в торфяных отложениях в зональном ряду лесотундра – северная тундра.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проведены в трех природных подзонах: лесотундре (уч. 1), южной тундре (уч. 2а и 2б) и северной тундре (уч. 5). Районы исследования расположены в Большеземельской тундре: в лесотундре в бассейне р. Усы, РК, в южной тундре в бассейне р. Хасырей-Ты-Вис, на границе РК и НАО и в северной тундре в восточной части Печорской губы (НАО), на территории распространения массивно-островной и сплошной многолетней мерзлоты [5].

В лесотундре исследования проведены в пределах плоско-бугристо-мочажинного комплекса на торфяной олиготрофной (мерзлотной) почве бугров и в торфяной олиготрофной почве мочажин. Болотный массив представляет собой бугристо-мочажинный комплекс с термокарстовыми озерами. В границах болота преобладают по площади торфяные бугры различной формы.

Торфяная олиготрофная (мерзлотная) почва бугров (уч. 1). Nemic Folic Cryic Histosol. Координаты: 67°03' N, 62°56' E. Почва описана в 7 км к юго-западу от ст. Сейда. Разрез заложен на бугре диаметром 10–12 м. Высота бугра 0.5–1.0 м. Глубина залегания многолетней мерзлоты 40 см. Микрорельеф мелкобугорковатый. В растительном покрове *Polytrichum commune*, *Pleurozium schreberi*, *Dicranum elongatum*, *Flavocetraria nivalis*, *Cladonia*

(*C. arbuscula*, *C. rangiferina*, *Cladonia coccifera*, *C. gracilis*, *C. crispata*), *Empetrum hermaphroditum*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Rubus chamaemorus*, *Vaccinium uliginosum* и *Betula nana* по краям бугра.

Торфяная олиготрофная почва мочажин (уч. 1). Fibric Floatic Cryic Histosol. Координаты: 67°03' N, 62°56' E. Разрез заложен в периферийной части болотного массива, в мочажине, расположенной к северу от деградированного бугра. Мочажина, обводненное понижение между плоскими буграми, вытянутое с севера на юг. Размеры: ширина в участке отбора 5(7) м, длина до 30 м. Глубина залегания многолетней мерзлоты 187 см, уровень грунтово-болотных вод 30–40 см. Растительный покров преимущественно образован пушицево-сфагновыми и осоково-сфагновыми фитоценозами. В травяно-кустарничковом ярусе доминирует *Eriophorum russeolum*, встречаются *Carex limosa* или *C. rotundata*. Напочвенный покров образован сфагновыми (в основном *Sphagnum riparium*, *S. lindbergii*, *S. balticum*) и бриевыми (*Warnstorfia exannulata*, *W. fluitans* и др.) мхами.

На большей части территории исследуемых участков южной тундры преобладают невысокие холмы и гряды ледникового и гляцио-морского происхождения, чередуются с широкими лощинами и озерными котловинами.

Торфяная олиготрофная (мерзлотная) почва бугров (уч. 2а). Fibric Folic Cryic Histosol. Координаты: 67°42'31.0" N, 63°24'47.9" E. Участок расположен в 4.5 км к югу от оз. Лекъямботы в приозерной депрессии на водоразделе малых рек Лекъямботывис и Нястишор. Территория ранее была занята озером, у которого по каким-то причинам понизился уровень воды, но избыточное увлажнение сохранилось. Разрез заложен на обширном плоском бугре, размером 17 на 35 м. Высота бугра 1–1.5 м. Глубина залегания многолетней мерзлоты 48 см. Микрорельеф мелкобугорковатый. В сообществе господствует *Ledum decumbens*, в значительном обилии присутствуют *Rubus chamaemorus*, *Vaccinium vitis-idaea* среди лишайников преобладают виды р. *Cladonia*, мхи представлены *Polytrichum juniperinum*, *P. strictum*, *Ptilidium ciliare*, *Sphagnum flexuosum*, видами р. *Dicranum*.

Торфяная олиготрофная (мерзлотная) почва мочажин (уч. 2а). Fibric Floatic Cryic Histosol. Разрез заложен в периферийной части болотного массива, в мочажине, расположенной в 100 м к юго-востоку от разреза Р-2а-1. Мочажина, обводненное понижение между плоскими буграми, вытянутое с северо-востока на юго-запад. Размеры: ширина в участке отбора 8.5 м, длина до 20 м. Глубина залегания многолетней мерзлоты 38 см. В травяно-кустарничковом ярусе доминирует *Carex rotundata*. Напочвенный покров образован *Sphagnum flexuosum* и *Warnstorfia fluitans*.

Торфяная олиготрофная (мерзлотная) почва бугров (уч. 2б). Fibric Folic Cryic Histosol. Координаты: 67°45'17.4" N, 63°17'33.2" E. Разрез заложен на плоском торфяном плато на территории НАО в 28 км к СЗ от п. Воргашор, 3.5 км к западу от оз. Лекъямботы, в бассейне р. Лекъямбо-Ты-Вис. Глубина залегания многолетней мерзлоты – 26 см. Поверхность плато имеет бугорковатый микрорельеф, в растительном покрове преобладают *Ledum decumbens*, *Rubus chamaemorus*, мохово-лишайниковый покров сложен *Polytrichum commune*, *Pleurosium schreberi*, видами р. *Dicranum*, р. *Cladonia*.

Торфяная олиготрофная (мерзлотная) почва мочажин (уч. 2б). Fibric Floatic Cryic Histosol. Разрез заложен в центре естественной трещины, пересекающей торфяное плато, в 30 м к юго-западу от разреза Р-2б-1. Ширина трещины 1–1.5 м, длина – 25–30 м. Глубина залегания многолетней мерзлоты – 80 см. Микрорельеф практически не выражен, участок ровный без видимых гряд. В растительном покрове преобладают сфагновые мхи, *Rubus chamaemorus*, *Eriophorum scheuchzeri*.

В северной тундре объекты исследования находятся на побережье Баренцева моря (Ненецкий АО) в пределах плоско-бугристо-мочажинного комплекса на торфяных олиготрофных (мерзлотных) почвах бугров и на торфяных олиготрофных (мерзлотных) почвах мочажин. Участок располагается на выровненной поверхности прибрежной равнины, которая характеризуется наличием обширных депрессий и соответственно вследствие слабого дренажа практически вся занята плоскобугристыми болотными комплексами, перемежающимися с сетью малых рек, ручьев и озерной мозаикой.

Торфяная олиготрофная (мерзлотная) почва бугров (уч. 5). Hemic Folic Cryic Histosol. Координаты: 68°35' N, 55°55' E. Центр гряды плоскобугристого болота. Форма бугра сложная, многоугольная, вытянутая с севера на юг, с резко вдающимися депрессиями мочажин и озерных понижений. На бугре присутствуют морозобойные трещины, пересекающие гряды поперек и оголенные пятна без растительного покрова d 0.3–0.7 м. Растительность: лишайники, бриевые мхи, багульник, морошка, подбел, водяника, брусника. Многолетняя мерзлота залегает на глубине 29–30 см.

Торфяная олиготрофная (мерзлотная) почва мочажин (уч. 5). Fibric Floatic Cryic Histosol. Координаты: 68°35' N, 55°55' E. Понижение рельефа, мочажина. Многолетняя мерзлота залегает на глубине 38–40 см, с глубины 60–70 см обнаруживаются минеральные включения.

Исследованы виды растений разных групп, доминирующие в растительном покрове болот и ботаническом составе торфа.

В лесотундре проведен отбор следующих видов растений: *Polytrichum strictum* Brid., *Sphagnum*

riparium Angstr., *Carex limosa* L., *Eriophorum russeolum* Fries, *Eriophorum vaginatum* L., *Comarum palustre* L., *Carex aquatilis* L., *Equisetum fluviatile* L., *Betula nana* L., ветви и листья *Salix lapponum* L., ветви и листья *Betula pubescens* Ehrh. и побеги *Picea abies* L. возраста 1–7 лет.

В южной тундре на уч. 2а были отобраны: *Sphagnum riparium*, *Sphagnum russowii*, *Rubus chamaemorus*, *Eriophorum russeolum*, *Eriophorum scheuchzeri*, *Carex aquatilis*, *Comarum polustre*, *Vaccinium uliginosum* и *Betula nana*. На уч. 2б: *Sphagnum riparium*, *Rubus chamaemorus*, *Eriophorum russeolum*, *Comarum polustre*, *Ledum palustre* и *Betula nana*.

В северной тундре были отобраны виды: *Flavocetraria nivalis*, *Alectoria nigricans*, *Sphagnum lindbergii*, *Carex aquatilis*, *Eriophorum russeolum*, *Ledum decumbens*, *Rubus chamaemorus*, *Betula nana*, *Salix lapponum*.

Отбор и пробоподготовка проб торфа проведены согласно ГОСТ 17644-83 и ГОСТ 11306-2013. Типы почв определены согласно “Классификации и диагностике почв России” (2004) [10] и WRB [30]. До границы многолетней мерзлоты послойный отбор проб произведен через каждые 5–10 см, далее каждые 10–20 см. Образцы почв и растений высушивали при комнатной температуре, измельчали и проводили химический анализ на содержание полиаренов. Химико-аналитические исследования торфа и растений методом ВЭЖХ выполняли в ЦКП “Хроматография” Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Для этого 1 г сухого измельченного образца торфа или растений помещали в экстракционную ячейку и трижды экстрагировали смесью дихлорметан : ацетон (1 : 1) при температуре 100°C. Полученные экстракты концентрировали на аппарате Кудерна-Даниша до объема 1–2 см³, затем добавляли 3–5 см³ *n*-гексана и испаряли экстракты до объема 1–2 см³. Разделение экстрактов проводили с помощью колоночной хроматографии с использованием оксида алюминия для удаления примесей, мешающих определению ПАУ. Элюат концентрировали на аппарате Кудерна-Даниша до объема 1–2 см³, затем добавляли 3 см³ ацетонитрила и сушили до 1–2 см³. Концентраты проб анализировали методом обращенно-фазовой ВЭЖХ в градиентном режиме и спектрофлуориметрическим детектированием (“Люмахром”, Lumex, Россия). Методика химического анализа подробно описана в источниках [17, 18]. Статистическая обработка результатов проведена с использованием программного пакета Statistica 6.1.

Анализ ботанического состава и степени разложения торфа выполнены в лаборатории болотных экосистем Института биологии Кар НЦ РАН. Данные ботанического состава представленные на рис. S1–S8.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

ПАУ в растениях. Исследование накопления ПАУ в болотных растениях трех природных подзон позволило выявить общие закономерности формирования состава ПАУ (рис. 1). В растениях всех исследованных подзон доминируют низкомолекулярные ПАУ (95–100% от общей суммы ПАУ). Повышенное содержание легких ПАУ в растениях болот отмечается в литературе [57]. Всего в растениях разных видов идентифицировано 11 ПАУ: нафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз[а]антрацен, бензо[б]флуорантен, бензо[к]флуорантен, бенз[а]пирен. Состав ПАУ растений разных видов тесно коррелирует от $r = 0.63$ до 1.00 (при $n = 11$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.55$)

Максимальное содержание ПАУ среди растений лесотундры 391–435 нг/г было выявлено в *Polytrichum strictum*, побегах *Picea abies*, ветвях *Betula pubescens*, в меньшей степени (271–277 нг/г) в ветвях *Salix lapponum* и *Betula nana*. Затем по количеству ПАУ следуют *Sphagnum riparium* (135 нг/г) и *Carex limosa* (191 нг/г). Максимальным содержанием ПАУ среди растений южной и северной тундры, где древесные виды и *Polytrichum strictum* не анализировали, отличаются сфагновые мхи *Ledum* и *Carex aquatilis*; массовая доля ПАУ в них составила 120–180 нг/г. Выявленное повышенное содержание ПАУ в *Betula nana* и *Salix lapponum* лесотундры связано с активным корневым поглощением нафталина из болотных вод, обогащенных данным соединением в связи со значительным содержанием в верхних торфяных горизонтах. По нашему мнению, в торфе ПАУ находятся в малодоступном для растений состоянии. Участки наших исследований достаточно обводнены. Установлено, что ПАУ пассивно поглощаются растениями вместе с водой и питательными веществами [33]. Транслокация ПАУ из надземных органов в корни не доказана [19, 36]. Следовательно, можно предположить, что ПАУ аккумулируются из болотных вод, в которых они находятся в растворенном состоянии [29, 34]. Существуют данные, что *Salix* sp. могут служить “органическими насосами” для удаления большого количества воды с загрязненных территорий [19], вместе с водой в растения поступают и легкорастворимые ПАУ, такие как нафталин. Этим может быть объяснен факт повышенных концентраций нафталина в кустарниках и деревьях лесотундры, в составе торфа которых содержится значительное количество нафталина. Виды с мощной корневой системой способны поглощать растворенные ПАУ из болотных вод. В экотоне южной и северной тундры таких закономерностей не выявлено, по-видимому, в связи с более низким содержанием нафталина в верхних слоях торфяников.

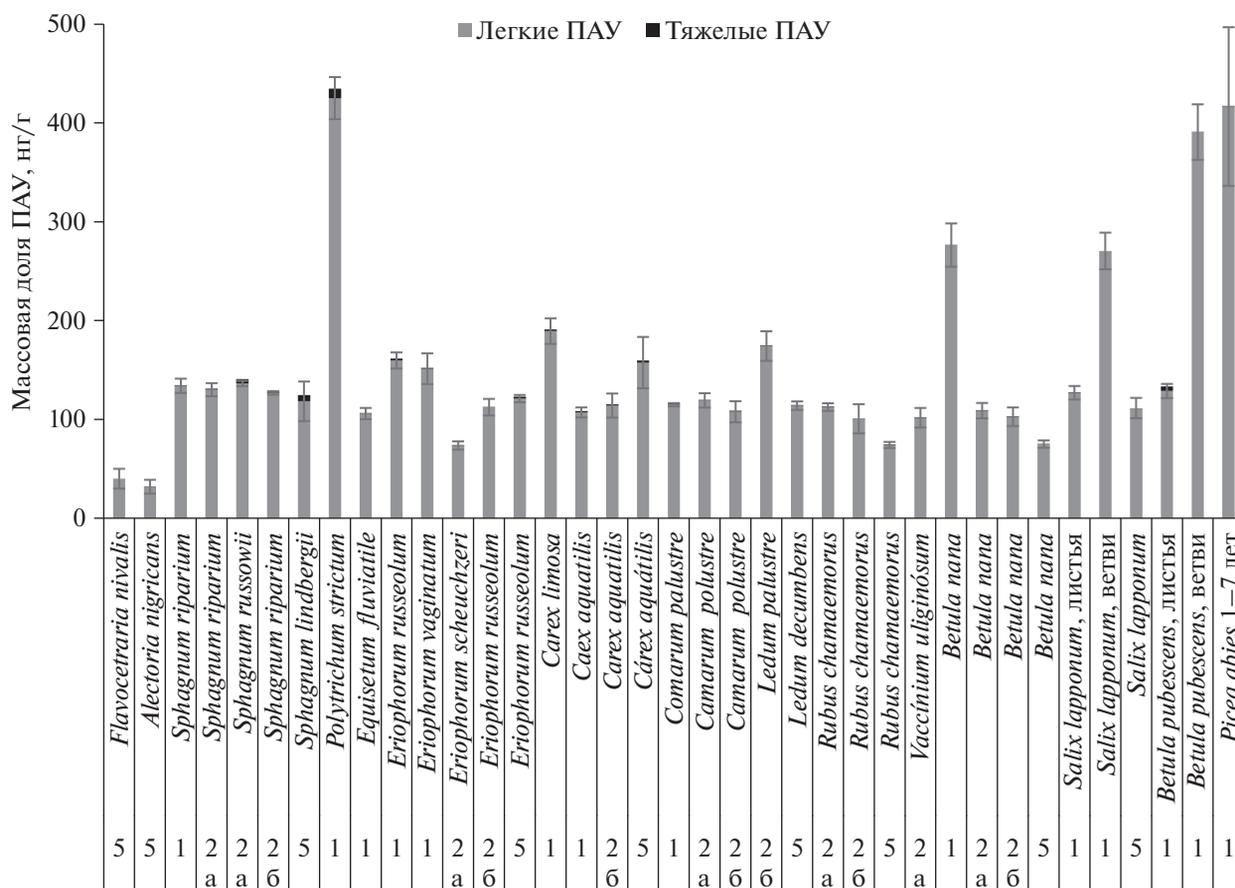


Рис. 1. Массовая доля ПАУ в растениях исследуемых природных зон, где 1 – лесотундра, 2 – южная тундра (участки 2а и 2б), 5 – северная тундра.

Для видов рода *Sphagnum* и *Carex aquatilis* на всех исследованных участках характерно повышенное относительно других видов содержание тяжелых ПАУ. Вероятно, это связано с тем, что мхи могут аккумулировать ПАУ всей поверхностью, а для осок с мощной и хорошо разветвленной корневой системой возможен корневой путь поступления ПАУ. В целом присутствие 5–6-ядерных ПАУ в растениях минимально. Зачастую высокомолекулярные ПАУ в растениях и почве не обнаруживаются, что связывают с отсутствием непосредственных источников загрязнения [43].

Присутствие полиаренов в растениях исследуемых болот может быть обусловлено рядом факторов: образованием ПАУ в растениях [4], поглощением ПАУ растениями из болотных вод [29, 34] и поступлением из атмосферы [26, 47, 48, 62].

Существуют предположения, что низкомолекулярные ПАУ могут синтезироваться растениями [4]. Наши эксперименты подтвердили, что растения, выращенные на незагрязненной почве, содержали в незначительном количестве легкие полиарены [16, 60]. Другие авторы указывают, что ПАУ входят в состав воска на поверхности ли-

стьев [23, 38]. Присутствие нафталина, фенантрена и перилена в растениях, особенно в стволах деревьев, указывает на их биологическое происхождение [37]. Существуют данные, что содержание ПАУ в кутикуле уменьшается с увеличением содержания воска [39, 58], что подтверждает естественное происхождение ПАУ в растительных восках. К настоящему моменту механизм синтеза ПАУ в растениях четко не установлен. Исследованиями 80-х годов лабораторно подтверждено образование фенантрена из стеролов в результате деструкции алифатических структур [14]. Стероидные структуры, содержащие гидроксильную группу, являются типичными составляющими липидов высших растений. В растениях присутствуют такие производные фенантрена, такие как абиетиновая и левопимаровая кислоты. Схема образования фенантрена из абиетиновой кислоты включает последовательную ароматизацию нафтеновых колец и потерю метильных заместителей, конечным продуктом которой является фенантрен. Показана возможность образования хризена в растениях [11, 14]. Хризен в растениях может быть продуктом превращения пентациклических

тритерпеноидов с шестичленным E-кольцом, являющихся основными компонентами воска высших растений. Известно, что физиологически-активные соединения (витамины, гормоны) имеют в структуре молекулы 2–3-ядерные структуры нафталинового и фенантренового типа. Современных исследований механизмов образования ПАУ нами не обнаружено. Многими учеными установлена возможность переноса ПАУ на дальние расстояния [20, 44, 51]. Так как растения способны активно накапливать полиарены из окружающей среды, вопрос о синтезе ПАУ в растениях остается дискуссионным.

Выполненные в последнее время исследования льда и снежного покрова Баренцева моря указывают на отсутствие аэротехногенного приноса ПАУ [46]. Одним из возможных источников нафталина в лесотундре является локальный перенос ПАУ из Воркутинского промышленного кластера – участка, находящегося в 70 км от исследованного. Согласно ранее полученным данным, пик накопления ПАУ в почвах и растениях в зоне действия угольной шахты Воркутинская приходится на расстоянии 500 м, в зоне действия ТЭС – 1000 м [62]. Другие авторы показали, что суммарное содержание ПАУ в почвах на расстоянии около 1000 м от предприятий электростанции уменьшилось в 2 раза, большей дальностью распространения характеризовались низкомолекулярные ПАУ [26, 48]. То есть тяжелые ПАУ с малой вероятностью могли поступить с атмосферными аэрозолями в изученные районы, вероятность же попадания нафталина, как наиболее летучего компонента, существует.

Массовая доля ПАУ во мхах рода *Sphagnum* и травянистых растениях (*Carex aquatilis* и *Eriophorum russeolum*) во всех исследованных подзонах примерно одинакова. Растения фоновых ключевых уч. 1, 2а, 2б и 5 довольно близки по составу ПАУ. Коэффициенты корреляции варьируют в пределах 0.96–0.99 для мха, травянистых растений и листьев кустарников, а для ветвей и корней кустарников составляют 0.67–0.87 (при $n = 11$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.55$). Статистическое подтверждение отсутствия различий в содержании большинства индивидуальных ПАУ в растениях одного вида для трех подзон позволяет экстраполировать данные по составу ПАУ изученных видов растений на другие фоновые бугристые болота.

ПАУ в торфе. Лесотундра. Растения напочвенного покрова и древесный опад служат основой формирования почв. Растительные остатки подвергаются разложению грибами и бактериями, поэтому состав ПАУ в процессе разложения может модифицироваться. Это ведет к значительным изменениям в составе ПАУ торфяников.

В торфяниках лесотундры идентифицировано 14 ПАУ [17]. Предположительно, высокомолеку-

лярные ПАУ (дибенз[a,h]антрацен и бенз[ghi]периллен), не обнаруженные в растениях, могут образоваться из сложных органических соединений лигнина, пентациклических терпенов, ароматических структур, входящих в состав болотных растений [12, 16, 59]. Преимущественно биопедогенное происхождение тяжелых ПАУ показано рядом авторов [22].

В верхних слоях торфа бугра до 30 см доминируют низкомолекулярные структуры ПАУ, суммарное содержание ПАУ варьирует незначительно – в пределах 412–496 нг/г (табл. 1). Далее массовая доля ПАУ возрастает с глубиной. В слое 40–60 см выявлены пиковые содержания ПАУ – 8391 нг/г, в частности бенз[ghi]перилена – 7857 нг/г. В естественных биоценозах как правило отмечается равномерное уменьшение содержания полиаренов с глубиной [9]. С глубины 60 см происходит уменьшение концентрации всех полиаренов в многолетнемерзлых слоях. По всей глубине торфяника показана обратная зависимость содержания нафталина и бенз[ghi]перилена в торфяных слоях до 548 нг/г. Такая зависимость была ранее установлена и другими исследователями для торфа болот в Швейцарии [24].

Сходным образом изменения в распределении ПАУ происходят в торфе мочажин. Легкие ПАУ преобладают в верхних слоях. Их доля достигает 100% от суммы ПАУ. Содержание полиаренов в торфе увеличивается с глубиной. Аналогично торфу бугров максимум накопления ПАУ (22084 нг/г) проявляется на границе сезонно талого слоя (СТС) (170–190 см) и обусловлен, главным образом, увеличением содержания бенз[ghi]перилена (21059 нг/г). В слое многолетней мерзлоты массовая доля ПАУ уменьшается до 4124 нг/г. Для торфа мочажин также характерна обратная тенденция в накоплении нафталина и бенз[ghi]перилена.

Торфяник мерзлотного бугра до глубины 25 см формируется как низинное болото, далее торфообразование проходит по верховому типу (рис. S1). Ботанический состав верхнего горизонта до 10 см представлен в основном *Polytrichum* sp., степень разложения торфа в данном слое составила 20–25%. Что обуславливает высокую степень корреляции состава ПАУ *Polytrichum strictum* с составом полиаренов торфа верхних слоев ($r = 0.67$, $n = 28$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.36$).

С глубиной (10–15 см) степень разложения торфа возрастает до 40%, коэффициент корреляции состава ПАУ торфа и растений доминантов ботанического состава достигает $r = 0.80$ (при $n = 28$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.36$) для *Polytrichum strictum*, *Betula nana* и ветвей *Salix lapponum*. Так как листья *Salix lapponum* разлагаются быстрее древесных остатков, для них был выявлен наименьший коэффициент корреляции $r = 0.54$ [3, 8].

Таблица 1. Массовая доля ПАУ в торфяниках лесотундры, нг/г

Горизонт, глубина, см	Нафталин	2–4-ядерные ПАУ без нафталина	Бенз[ghi]перилен	5–6-ядерные ПАУ без бенз[ghi]перилена	ΣПАУ
Торфяная олиготрофная (мерзлотная) почва бугров					
T1, 0–5	116	315	23	51	482
T1, 5–10	222	193	13	30	445
T2, 10–15	180	285	16	31	496
T2, 15–20	197	184	16	36	417
T3, 20–25	167	214	19	31	412
T3, 25–30	187	247	25	37	471
T3, 30–35	139	197	270	279	615
T3, 35–40	123	286	1663	1704	2113
T4 _L , 40–60	108	376	7857	7908	8391
T5 _L , 60–80	187	228	1873	1890	2304
T6 _L , 80–100	92	268	410	420	780
T7 _L , 100–125	69	233	140	151	452
T7 _L , 125–150	77	314	1125	1163	1554
TCg _L , 150–175	66	311	770	851	1229
Gh _L , 175–200	119	254	165	176	548
Торфяная олиготрофная почва мочажин					
T1, 0–10	54	46	0	0	101
T2, 10–18	143	140	0	37	319
T3, 18–30	144	124	0	33	301
T4, 30–40	99	65	6	3	172
T5, 40–50	107	65	37	12	221
T6, 50–60	101	97	5	5	208
T7, 60–80	348	52	0	43	443
T8, 80–100	168	36	0	28	231
T9, 100–120	1749	32	24	24	1828
T11, 120–135	975	51	68	9	1102
T12, 135–150	703	63	3795	34	4595
T13, 150–170	594	88	6453	47	7182
T14, 170–190	742	111	21059	171	22084
TCg _L , 190–207	1340	216	2256	312	4124

На глубине 25–35 см торфообразование проходит по низинному типу в условиях избыточного увлажнения, в формирование ботанического состава торфа значительный вклад вносят виды *Eriophorum* и *Carex*. Коэффициенты корреляции с составом ПАУ торфа для растений минимальны, но значимы $r = 0.41–0.52$ (при $n = 28$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.36$) для *Eriophorum* sp., *Betula nana* и ветвей *Salix lapponum*. Не значимые корреляции выявлены для *Carex limosa* и листьев *Salix lapponum*. Именно в этих слоях в торфе появляется бенз[ghi]перилен. В нашем случае при интенсивном разложении пушиц и осок может происходить разрушение лигнина, что приводит к новообразованию высокомоле-

кулярных структур полиаренов. Как известно, древесные растения и травы содержат большее количество лигнина по сравнению со мхами. Для трав доля лигнина на сухой вес составляет 15–20%, тогда как для мхов – 8–10%. Для древесных пород значения достигают 30% [1, 12]. Важную роль в образовании полиаренов играет и высокая скорость разложения травянистых растений; по данным ряда исследователей она в 25 раз больше по сравнению со мхами [3]. На основании изучения природной модели разложения торфа можно предположить, что формирование торфа начинается с перекомбинации легких структур ПАУ, входящих в состав растений торфообразователей [17].

В ходе формирования торфяников высокомолекулярные органические соединения растений (главным образом травянистых) под действием микробиологических процессов постепенно разлагаются с новообразованием тяжелых структур ПАУ и появлением дополнительного количества легких полиаренов [8].

В глубоко расположенных горизонтах торфа корреляции между составом ПАУ торфа и современной растительностью не значимы, что обусловлено активной трансформацией хорошо разложенных органических растительных остатков с образованием большого количества высокомолекулярных ПАУ.

Для торфа мочажин получены взаимосвязи, идентичные выявленным для торфяного бугра. До глубин 60 см торф мочажин формируется по переходному типу. Степень разложения торфа в слое 0–60 см составила 5–15%, в ботаническом составе доминирует *Sphagnum riparium* с незначительной примесью *Eriophorum* sp. (рис. S2). В связи с низкой степенью разложения, состав ПАУ торфа верхних горизонтов и растений значимо коррелирует $r = 0.83–0.88$ ($n = 84$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.30$).

Увеличение степени разложения торфа до 30–40% на глубине 60–135 см ведет к уменьшению коэффициентов корреляции состава полиаренов торфа и растений, доминирующих в его ботаническом составе (*Sphagnum riparium*, *Carex* sp., *Eriophorum* sp., *Betula pubescens*) $r = 0.61–0.78$ ($n = 56$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.30$). Полученные данные позволяют предположить, что состав ПАУ торфа на больших глубинах определяется не составом ПАУ в растений, а новообразованием 5–6-ядерных полиаренов в процессе торфообразования.

Корреляционные взаимосвязи между составом ПАУ растений и торфа на глубинах 135–200 см отсутствуют. Данные слои сформированы в условиях низинного болота, и именно в них выявлен пиковый рост содержания бенз[ghi]перилена, что соответствует данным, полученным для торфа бугра.

В целом корреляционный анализ показал, что степень разложения торфа оказывает влияние на взаимосвязь состава ПАУ растений и торфа, за исключением границы СТС и мерзлотных слоев. При высокой степени разложения торфа состав ПАУ растений в меньшей степени влияет на состав ПАУ торфа.

Южная тундра. Исследование содержания ПАУ торфяных бугров и мочажин южной тундры позволило идентифицировать 13 индивидуальных ПАУ. В торфе по сравнению с участком лесотундры не выявлено присутствие аценафтена. Содержание ПАУ в торфе на исследованных участках южной тундры (уч. 2а, табл. 2 и уч. 2б, табл. 3) сильно отличается. Так как возраст формирования бугров, согласно датированию, близок, возможно, различия ПАУ связаны с условиями образования

торфяников. Торфяник бугра на уч. 2а возник в более сухих условиях и развивался как верховой на протяжении всей своей истории. Тогда как торфяник бугра уч. 2б оформился как низинный и проходил стадию сильного обводнения с присутствием в ботаническом составе роголистника, рдеста и других погруженных растений. Высокая степень разложения торфов свидетельствует о переносе в водном режиме и активном разложении растительных остатков в торфе. На данной стадии формирования возможно дополнительное поступление полиаренов с грунтовыми водами. Эти факторы, наряду с особенностями ботанического состава, приводят к образованию повышенных концентраций тяжелых ПАУ, достигающих 116484 нг/г в торфянике бугра на уч. 2б.

Для торфяников лесотундры также были характерны повышенные массовые доли тяжелых ПАУ и, в частности, бенз[ghi]перилена в слоях многолетней мерзлоты, формирование которых происходит на эвтрофной стадии болотообразования. Аномальные массовые доли бенз[ghi]перилена были описаны в других работах по исследованию торфяников при анализе глубоких слоев торфа [2, 13, 32]. Было показано, что бенз[ghi]перилена в торфяниках скорее всего имеет непирогенную природу и, вероятно, является продуктом трансформации лигнина, поскольку глубокие торфяные горизонты характеризуются повышенной массовой долей древесной и травянистой растительности и большой долей лигнина. Источником избыточного содержания ПАУ теоретически могли бы быть пожары, но на исследуемой территории в современный период пожарной активности зафиксировано не было. В более ранние периоды торфообразования пожары, возможно, проходили. В данной работе не анализировалось присутствие частиц углей или каких-либо других пирогенных изменений в исследованных горизонтах торфа. Но следует отметить, что исследования [25, 50], в том числе проведенные в данном регионе, не подтверждают существенного накопления бенз[ghi]перилена при пирогенном изменении органических горизонтов почв [6, 7].

Можно предположить, что активное образование тяжелых полиаренов из высокомолекулярных органических соединений торфа в период климатического оптимума обусловлено условиями интенсивного переувлажнения и избыточных температур. Основным источником сложных органических веществ – предшественников ПАУ, таких как лигнин, являются древесные и травянистые виды, преобладающие в ботаническом составе слоев торфа, которые отличаются пиковыми значениями 5–6-ядерных структур ПАУ.

Массовая доля ПАУ в почвах торфяных бугров уч. 2а до глубины 25 см остается неизменной (122–152 нг/г) и близкой к содержанию ПАУ в

Таблица 2. Массовая доля ПАУ в торфяниках южной тундры (уч. 2а), нг/г

Горизонт, глубина, см	Нафталин	2–4-ядерные ПАУ без нафталина	Бенз[ghi]перилен	5–6-ядерные ПАУ без бенз[ghi]перилена	ΣПАУ
Торфяная олиготрофная (мерзлотная) почва бугров					
T1, 0–5	91	48	2	6	147
T1, 5–10	86	49	3	14	152
T2, 10–15	110	21	1	3	135
T2, 15–20	93	22	3	5	122
T3, 20–25	106	18	13	9	146
T3, 25–30	174	27	12	20	234
T4, 30–35	182	33	3	61	280
T4, 35–40	199	54	6	62	320
T5, 40–45	247	56	8	57	367
T5, 45–48	218	45	7	64	335
T6 _⊥ , 48–60	168	18	16	19	221
T7 _⊥ , 60–70	124	32	3	37	196
T7 _⊥ , 70–80	116	60	7	18	201
T8 _⊥ , 80–90	660	49	10	47	765
T8 _⊥ , 90–100	304	46	26	50	426
T9 _⊥ , 100–110	141	133	30	129	434
T9 _⊥ , 110–120	168	126	40	251	585
T10 _⊥ , 120–130	55	77	413	251	795
TCg _⊥ , 130–148	24	59	12	201	297
Chg _⊥ , 148–158	30	29	4	112	174
Cg1 _⊥ , 158–168	22	11	6	62	102
Cg2 _⊥ , 168–200	17	7	10	20	54
Торфяная олиготрофная (мерзлотная) почва мочажин					
T1, 0–5	52	72	2	12	137
T1, 5–10	60	98	7	30	194
T2, 10–15	45	34	8	8	95
T2, 15–20	76	45	5	5	132
T3, 20–25	74	40	12	11	137
T3, 25–30	149	40	6	11	206
T4, 30–35	326	41	15	5	386
T4, 35–38	492	47	0	24	564
T5 _⊥ , 38–50	121	37	0	5	163
T6 _⊥ , 50–60	36	25	0	5	66
TC1, 60–70	15	17	0	0	32
TC2 _⊥ , 70–80	21	17	0	0	38
C, 80–90	12	16	0	0	28
Cg _⊥ , 90–100	10	16	0	0	26

растениях. На глубинах 25–48 см содержание ПАУ в торфе возрастает в 2 раза, что обусловлено значительным увеличением содержания 5–6-ядерных ПАУ и нафталина. Повышение содержания ПАУ на границе СТС выявлено и в торфяниках лесотундры. В слоях многолетней мерзлоты

(48–80 см) обнаружено уменьшение содержания ПАУ до значений верхних слоев также за счет тяжелых структур и нафталина. На глубинах 80–130 см содержание ПАУ резко (до 5 раз) возрастало по сравнению с верхними горизонтами. На глубине 80–100 см уменьшение содержания ПАУ обу-

Таблица 3. Массовая доля ПАУ в торфяниках южной тундры (уч. 2б), нг/г

Горизонт, глубина, см	Нафталин	2–4-ядерные ПАУ без нафталина	Бенз[ghi]перилен	5–6-ядерные ПАУ без бенз[ghi]перилена	ΣПАУ
Торфяная олиготрофная (мерзлотная) почва бугров					
T1, 0–5	75	81	11	0	167
T1, 5–10	72	50	353	6	481
T1, 10–15	116	85	23	15	239
T2, 15–20	150	118	12	29	309
T3, 20–26	104	51	14	19	189
T4 _⊥ , 26–40	144	61	63	200	467
T5 _⊥ , 40–50	198	305	131	113	747
T6 _⊥ , 50–60	154	115	1564	38	1871
T7 _⊥ , 60–80	250	107	173	80	610
T8 _⊥ , 80–100	149	108	139	34	430
T9 _⊥ , 100–120	148	106	1080	33	1367
T10 _⊥ , 120–140	170	98	34500	483	35250
T11 _⊥ , 140–160	154	59	87618	580	88410
T12 _⊥ , 160–180	123	73	115613	871	116680
T13 _⊥ , 180–200	188	254	44779	477	45698
T14 _⊥ , 200–220	119	71	15689	233	16112
T15 _⊥ , 220–240	169	73	89088	1147	90478
T16 _⊥ , 240–260	91	50	8313	89	8543
Tc _g ⊥, 260–280	47	31	355	9	441
Gh _⊥ , 280–300	51	13	149	7	220
G _⊥ , 300–315	15	16	0	4	35
Торфяная олиготрофная (мерзлотная) почва мочажин					
T1, 0–5	42	46	0	0	87
T1, 5–10	50	91	8	0	149
T2, 10–15	37	62	16	21	137
T2, 15–20	27	33	7	0	67
T3, 20–25	40	34	39	0	112
T3, 25–30	64	39	38	0	141
T4, 30–35	60	39	44	0	142
T4, 30–40	55	39	56	0	150
T5, 40–50	51	56	167	99	373
T6, 50–60	90	111	443	1821	2465
T7, 60–70	109	36	226	84	455
T8, 70–80	68	48	129	10	255

словлено уменьшением количества нафталина, а на больших глубинах других 2–4-ядерных структур и тяжелых ПАУ, в том числе бенз[ghi]перилена. Ниже 130 см в органо-минеральных и минеральных слоях вследствие общего уменьшения содержания органического углерода происходит уменьшение содержания ПАУ до 54 нг/г. По всей глубине залегания торфяного бугра показана обратная взаимосвязь накопления нафталина и

бенз[ghi]перилена, которая была характерна и для торфяников лесотундры. Причиной обратной связи между нафталином и бенз[ghi]периленом, выявленной на всех исследуемых объектах, может быть изменение кормодобывающей стратегии микроорганизмов торфа [38]. В условиях отсутствия легких веществ микробы прилагают максимальные усилия для добычи пищи из высокомолекулярных структур и производят большое ко-

личество нафталина, бенз[ghi]перилена и других высокомолекулярных ПАУ.

В почвах мочажин уч. 2а можно наблюдать минерализацию, а, следовательно, низкие концентрации ПАУ 32 нг/г уже на глубинах 60–70 см. Суммарное содержание ПАУ в верхних слоях (до 30 см) мочажин близко его содержанию в торфе бугров на тех же глубинах, что свидетельствует об их схожем формировании. На глубине 30–50 см содержание ПАУ возрастает до 386 нг/г, главным образом за счет нафталина. Максимальное содержание (564 нг/г) приходится на глубины 30–38 см, где увеличилось и содержание 5–6-ядерных ПАУ. Этот слой находится на границе СТС, как и на торфяном бугре. Тенденция обратной зависимости в накоплении нафталина и бенз[ghi]перилена также присутствует по всему профилю мочажины.

Содержание ПАУ в торфе бугра участка 2б больше, чем на уч. 2а, из-за огромных количеств бенз[ghi]перилена и в меньшей степени других тяжелых ПАУ в слоях 120–140 см.

В верхнем горизонте 0–5 см содержание ПАУ (167 нг/г) на глубине 5–50 см оно возрастает в 2–4 раза за счет нафталина и тяжелых ПАУ, такое же распределение характерно для участка 2а. Выявлена тенденция возрастания содержания тяжелых ПАУ и нафталина с глубиной. На глубинах 50–240 см показано резкое увеличение количества бенз[ghi]перилена с пиком на глубине 50–60 см – 1564 нг/г. Максимальное содержание бенз[ghi]перилена (115613 нг/г) отмечено на глубине 160–180 см. Наивысшие количественные значения других тяжелых полиаренов 1147 нг/г выявлены на глубине 220–240 см, и в меньшей степени выражен на 160–180 см – 871 нг/г. На глубинах более 240 см в связи с включением минеральных отложений содержание всех ПАУ резко уменьшается до 35 нг/г. До глубины 220 см изменение содержания нафталина обратно изменению концентрации бенз[ghi]перилена, на большей глубине массовая доля данных соединений изменяется сходным образом.

Для мочажины уч. 2б характерны довольно низкие значения содержания полиаренов до глубины 40 см – 67–150 нг/г. В верхнем слое (0–5 см) отсутствовали тяжелые структуры, он был образован, по-видимому, не разложившейся растительностью. На глубине 40 см начался рост содержания ПАУ за счет тяжелых структур, в том числе бенз[ghi]перилена, с максимумом на глубине 50–60 см – 2465 нг/г. На глубине 70–80 см содержание ПАУ уменьшилось до 255 нг/г. Тенденция обратной зависимости массовой доли нафталина и бенз[ghi]перилена по профилю слабо выражена из-за отсутствия бенз[ghi]перилена в верхней части профиля. Данная мочажина не до конца оформлена, представляет собой протоку, поэтому низкие значения содержания ПАУ могут быть связаны с процессами вымывания их из профиля торфяника.

В целом распределение ПАУ в торфяных буграх южной тундры сходно, если не рассматривать дополнительный вклад бенз[ghi]перилена.

Торфяник бугра уч. 2а на протяжении всей истории формируется как верховое или переходное болото (рис. S3). Ботанический состав слоя 0–10 см на 55% образован кустарничками и кустарниками. Коэффициенты корреляции между составом торфа данных горизонтов и растений составили $r = 0.91$ для *Betula nana*, $r = 0.92$ для *Vaccinium uliginosum* ($n = 26$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.39$). Растительные остатки слабо разложены поэтому значительного содержания тяжелых структур ПАУ в торфе не обнаружено.

На глубине 10–30 см 40% ботанического состава торфа представлено осоками и пушицами. Коэффициенты корреляции для данных горизонтов торфа и *Eriophorum scheuchzeri*, *Carex aquatilis* равны $r = 0.84$ ($n = 52$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.23$). Степень разложения для данных горизонтов достигает 30%, что приводит к увеличению содержания дибенз[a,h]антрацена, бенз[ghi]перилена за счет разложения лигнина травянистых видов до структур ПАУ.

Слой торфа 40–100 см хорошо разложен и на 25–50% представлен древесными видами *Betula* sp. и на 45–70% пушицами. По-видимому, его формирование происходит в период климатического оптимума. Коэффициенты корреляции состава торфа и *Eriophorum scheuchzeri* меньше, чем для верхних слоев, но значимы $r = 0.69$ ($n = 91$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.17$). Следует отметить, что при однообразии ботанического состава и одинаковой степени разложения торфа в горизонтах 48–80 см наблюдается уменьшение содержания нафталина и тяжелых ПАУ. Возможно, выявленный минимум содержания ПАУ обусловлен климатическими особенностями, спровоцировавшими активное микробиологическое разложение ПАУ до простых соединений. Активному разложению ПАУ могут способствовать аэробные условия формирования торфяного бугра. В дальнейшем они “консервируются” в слое многолетней мерзлоты. Сезонно-талый слой (40–48 см) при этом находится в активной стадии разложения травянистой растительности, что провоцирует новообразование ПАУ. С глубины 80 см вновь отмечается увеличение содержания ПАУ.

С глубиной ботанический состав торфа изменяется и становится более разнообразным, появляется несколько видов осок и *Equisetum*, вклад древесных и кустарниковых растений уменьшается, с глубины 140 см в слоях преобладают минеральные включения почвообразующей породы. Это приводит к уменьшению коэффициентов корреляции состава ПАУ растений и торфа. Как и в условиях лесотундры установлена зависимость корреляции между составом ПАУ торфа и расте-

ний торфообразователей со степенью разложения торфа характерная для верхних слоев торфяника.

Торф мочажины уч. 2а также формируется как переходный и верховой (рис. S4). В верхней части профиля в ботаническом составе торфа доминируют сфагновые мхи (60–70%) и травянистые виды (20–30%). Коэффициенты корреляции между составом ПАУ торфа слоев 20–30 см и *Sphagnum riparium* и *Sphagnum russowii* составили $r = 0.75–0.79$ ($n = 78$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.18$) соответственно. Для *Carex aquatilis* и *Eriophorum scheuchzeri* $r = 0.86–0.88$ ($n = 78$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.18$). Высокие коэффициенты корреляции во многом связаны с незначительной степенью разложения торфа – 15–20%.

С глубины 30–50 см степень разложения торфа увеличивается до 25–40%. Данный слой, по-видимому, сформирован в период климатического оптимума. Доля мхов в ботаническом составе уменьшилась до 30–35%, доля травянистых видов возросла до 60%. На глубине 40 см в составе торфа появляются древесные виды, доля которых максимальна в слое 40–50 см. В горизонтах СТС, где происходит активная трансформация растительных остатков на глубине 30–38 см выявлен пик накопления ПАУ. С глубины 38 см растительные остатки “законсервированы” и не подвергаются дальнейшей трансформации.

Коэффициенты корреляции для состава ПАУ слоев торфа 30–50 см и растений доминантов ботанического состава меньше, чем в верхних слоях. Для *Sphagnum riparium* и *Sphagnum russowii* они составили $r = 0.60$ и $r = 0.66$ ($n = 39$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.32$), для *Carex aquatilis* и *Eriophorum scheuchzeri* $r = 0.84$ и $r = 0.79$ ($n = 78$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.18$) соответственно.

Горизонты 50–80 см содержат минимальное количество полиаренов. В ботаническом составе доминируют хорошо разложенные осоки и пушицы, их вклад достигает 95%. В торфе присутствуют глинистые и песчаные частицы. Коэффициенты корреляции для *Carex aquatilis* и *Eriophorum scheuchzeri* и торфа нижних горизонтов составили $r = 0.88$ ($n = 52$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.23$), коэффициенты могут быть достаточно высоки из-за максимального вклада данных видов в ботанический состав торфа.

Торф уч. 2б на начальном этапе развития формировался в эвтрофных условиях (рис. S5). Возможно, это определило значительные количественные отличия в накоплении ПАУ нижних слоев торфа. Ботанический состав верхних горизонтов (0–26 см) определяется главным образом слабо разложенными мхами, в том числе на 45–70% сфагновыми. Коэффициенты корреляции состава ПАУ мхов *Sphagnum riparium* и торфа значимы и составляют $r = 0.42$ ($n = 52$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.23$),

такие низкие значения коэффициентов корреляции во многом связаны с пиком накопления бенз[ghi]перилена в слое торфа 5–10 см. Без учета данного значения коэффициент корреляции составляет $r = 0.82$ ($n = 52$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.23$). Образование данного соединения может быть обусловлено случайным привнесом, так как оно не типично для верхних слоев фоновых торфяников. Для слаборазложившегося горизонта (0–5 см) коэффициенты корреляции состава ПАУ торф – *Sphagnum riparium* значительны $r = 0.88$ ($n = 13$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.56$).

С глубины 26 см ПАУ находятся в “законсервированном” состоянии. Формирование слоев до глубины 80 см проходило в условиях переходного болота. В ботаническом составе доминируют осоки и пушицы (до 60%), присутствует 20–45% древесных и кустарниковых видов. Для данных слоев отмечено возрастание массовой доли тяжелых ПАУ и, главным образом, бенз[ghi]перилена, что может быть обусловлено образованием ПАУ при разложении лигнина травянистых и древесных видов. Степень разложения в данном горизонте возрастает до 30%. Активное образование бенз[ghi]перилена и других высокомолекулярных ПАУ в торфяных слоях приводит к резкому уменьшению коэффициентов корреляции между содержанием ПАУ в торфе и растениях. Для доминирующих в ботаническом составе торфа *Carex aquatilis* и *Eriophorum russeolum* и торфа горизонтов 26–80 см коэффициенты корреляции составляют $r = 0.1$ ($n = 52$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.23$). Для более глубоких слоев также не было выявлено значимых корреляций, что во многом обусловлено резким скачком содержания бенз[ghi]перилена. Пиковые значения содержания бенз[ghi]перилена характерны для низинной стадии формирования торфа с глубины 120 см. Степень разложения растений на данных глубинах не высока и составляет 20–25%. Это позволяет предположить возможные дополнительные источники ПАУ для данного торфяника, ПАУ могут поступать с грунтовыми водами в условиях интенсивного увлажнения. С глубины 260 см торф смешан с песком и глиной. Содержание ПАУ резко уменьшается и достигает такового верхних слоев.

Ботанический состав торфа мочажины уч. 2б на глубине 0–15 см представлен слаборазложившимся сфагновым торфом (до 90%) и пушицами (на 10%, рис. S6). Коэффициенты корреляции состава ПАУ торфа и мхов *Sphagnum riparium* достаточно высоки и составляют $r = 0.90$ ($n = 39$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.32$), для *Eriophorum russeolum* $r = 0.89$ ($n = 39$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.32$).

На глубинах 20–40 см содержание тяжелых ПАУ возрастает в 2–3 раза, что обусловлено увеличением в ботаническом составе торфа доли травянистых и древесных видов – источников лигнина. Степень разложения торфа варьирует в

диапазоне 20–35% и возрастает с глубиной. Коэффициенты корреляции состава ПАУ торфа и мхов *Sphagnum riparium* составляют $r = 0.73$ ($n = 39$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.32$), для *Eriophorum russeolum* и *Carex aquatilis* $r = 0.75$ ($n = 65$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.20$). Уменьшение коэффициентов корреляции вероятно связано с увеличением степени разложения торфа.

В более глубоких слоях резко увеличивается массовая доля бенз[ghi]перилена, пиковый рост которого связан с присутствием в ботаническом составе торфа значительных количеств *Carex cespitosa*, *Eriophorum* и древесно-кустарничковых видов. Торф в данных слоях значительно разложен, что может привести к новообразованию бенз[ghi]перилена из сложных органических соединений – продуктов трансформации растительных остатков.

Данные, полученные для торфяников южной тундры, подтверждают закономерности, выявленные для лесотундры. Для торфяников уч. 2а показана сходная закономерность активного накопления полиаренов на границе СТС. Разница в накоплении ПАУ, обусловленная повышенными концентрациями бенз[ghi]перилена, вероятно объясняется, тем, что этот торфяник формировался в более сухих условиях, как верховой, на протяжении всей своей истории, тогда как торфяник уч. 2б – низинный и проходил стадию сильного обводнения. Низинная стадия формирования торфа характерна и для торфяников лесотундры.

Северная тундра. В бугристых торфяниках северной тундры, как и в южной, обнаружено 13 ПАУ [18]. Для торфяных бугров северной тундры (табл. 4) в слоях 0–30 см значения суммарного содержания ПАУ варьируют в небольших пределах (87–213 нг/г) и соответствуют данным, полученным для южной тундры. Отмечено резкое уменьшение содержания высокомолекулярных полиаренов на границе многолетней мерзлоты – до 2 нг/г. Суммарная массовая доля полиаренов также сокращается с глубиной (до 2 раз) в многолетнемерзлых слоях (30–80 см), а затем возрастает (до 476 нг/г) за счет прироста тяжелых структур полиаренов с максимальным содержанием на глубине 120–133 см. Слой торфа 120–133 см сформировался на низинной стадии образования, что совпадает с данными, полученными для торфяников ранее рассмотренных зон, и подтверждает гипотезу о формировании избыточных количеств тяжелых ПАУ в условиях сильного обводнения и повышенных температур и минерализации грунтовых и болотных вод. Увеличение доли минеральных отложений привело к резкому уменьшению массовой доли полиаренов на глубинах 133–188 см – до 5 нг/г. Массовые доли нафталина и бенз[ghi]перилена в слое 0–100 см демонстрируют обратную зависимость, установленную для других исследованных зон.

Распределение ПАУ в мочажинах аналогично таковому на бугре. Массовая доля ПАУ в СТС изменяется слабо – от 133 до 156 нг/г и в 2–4 раза уменьшается в многолетнемерзлых породах. Пиковых значений ПАУ в торфе мочажины не выявлено. До глубины 60 см имеет место обратная связь в накоплении нафталина и бенз[ghi]перилена.

Верхние горизонты торфяника бугра формируются как верховое болото (рис. S7). В ботаническом составе слоя 0–28 см господствуют *Eriophorum* sp. и в меньшей степени *Sphagnum* sp. Представленный главным образом легко разлагаемыми травами [3], слой деструктурирован на 40%. При этом коэффициенты корреляции состава ПАУ для представленных растительных видов и торфа довольно высоки $r = 0.93–0.96$ ($n = 65$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.24$). С глубиной (28–40 см) доминирование в ботаническом составе переходит к *Sphagnum* sp., степень разложения торфа несколько уменьшается, что приводит с одной стороны к росту коэффициентов корреляции состава *Sphagnum lindbergii* и *Eriophorum russeolum* и торфа до $r = 0.97–0.98$ ($n = 13$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.55$), с другой, к снижению содержания ПАУ в торфяном слое. На глубине 40–80 см коэффициенты корреляции растений-доминантов и торфа несколько уменьшаются – до $r = 0.87–0.91$ ($n = 39$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.32$). С глубины 80 см в составе торфа появляются остатки *Betula nana*, что привело к увеличению содержания тяжелых полиаренов в торфе. Максимальный прирост ПАУ характерен для хорошо разложенного (40–45%) слоя 120–133 см, преимущественно представленного *Eriophorum* sp. и *Cárex* sp. Коэффициенты корреляции между составом ПАУ в торфе данного слоя и в растениях уменьшаются, но остаются значимыми $r = 0.62–0.91$ ($n = 13$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.553$). В целом выявлено уменьшение коэффициентов корреляции для растений разных видов и торфа с глубиной. Закономерности влияния степени разложения торфа на его состав ПАУ подтверждают данные, полученные для других исследованных зон.

Формирование мочажины проходит по верховому типу, что определяет отсутствие пика накопления ПАУ в слоях многолетней мерзлоты (рис. S8). Доминантом ботанического состава по всему профилю выступает *Sphagnum* sp. Степень разложения торфа возрастает по профилю с глубиной от 5 до 30%. При движении вниз по профилю уменьшается вклад в ботанический состав *Eriophorum* sp. и *Cárex* sp., он варьирует в пределах 5–30%. По всему профилю торфяника выявлены значимые корреляции состава ПАУ торфа и *Sphagnum lindbergii* ($r = 0.81$), *Eriophorum russeolum* ($r = 0.84$), *Cárex aquatilis* ($r = 0.50$, $n = 163$, $p < 0.05$, $r_{cr} = 0.16$). Более низкие значения коэффициента корреляции для *Cárex aquatilis* объясняются при-

Таблица 4. Массовая доля ПАУ в торфяниках северной тундры, нг/г

Горизонт, глубина, см	Нафталин	2–4-ядерные ПАУ без нафталина	Бенз[ghi]перилен	5–6-ядерные ПАУ без бенз[ghi]перилена	ΣПАУ
Торфяная олиготрофная (мерзлотная) почва бугров					
Очес, 0–+2	60	23	0	5	87
T1, 0–5	101	37	0	11	150
T1, 5–10	86	118	0	10	213
T1, 10–18	96	68	5	2	170
T2, 18–23	120	40	3	6	169
T2, 23–28	138	54	0	2	195
T3 _L , 30–40	53	58	3	14	128
T4 _L , 40–50	35	29	0	10	75
T5 _L , 50–60	39	32	8	9	87
T6 _L , 60–80	66	28	5	8	107
T7 _L , 80–100	170	38	0	14	222
T8 _L , 100–120	74	27	42	13	156
T9 _L , 120–133	147	63	138	127	476
T10G _L , 133–151	23	21	3	9	56
T11G _L , 151–174	37	14	10	4	66
G1 _L , 174–188	31	16	0	3	50
G2 _L , 188–195	0	5	0	0	5
Торфяная олиготрофная (мерзлотная) почва мочажин					
T1, 0–5	53	37	11	12	113
T1, 5–10	60	64	3	9	136
T2, 10–15	69	33	9	6	116
T2, 15–20	74	23	0	18	115
T3, 20–25	105	28	0	5	138
T3, 25–30	107	32	0	5	144
T4, 30–35	105	41	0	3	149
T4, 35–38	109	32	6	9	156
T5 _L , 38–50	41	26	1	1	70
T6 _L , 50–60	45	23	3	4	76
T7G _L , 60–70	24	26	0	1	51
T8Cg _L , 70–80	28	24	0	1	52
T9G _L , 80–90	17	16	0	0	33
T10G _L , 90–100	32	32	0	3	67

сутствием в ботаническом составе торфа нескольких видов осок.

Выявлено уменьшение содержания ПАУ в торфе северной тундры по сравнению с лесотундрой и южной тундрой. Данный факт может быть связан с более холодными условиями формирования торфяника северной тундры [18]. Так лигнин, в результате деструкции которого в торф поступают значительные количества ПАУ, разлагается базидиомицетами [15]. Продемонстрирована зависимость функциональных групп грибов от температуры [21, 54]. Установлено, что для разви-

тия разрушающей лигнин микробиоты необходимы довольно высокие температуры – более +8°С. Предположительно при потеплении состав грибкового сообщества будет изменяться в пользу грибов, разлагающих лигнин и подобные устойчивые органические соединения [21].

Таким образом, тренды изменения содержания ПАУ в торфе на протяжении голоцена можно охарактеризовать следующим образом. При формировании торфа в период климатического оптимума голоцена в условиях избыточного увлажнения по низинному типу с преобладанием травя-

нистой и древесной растительности в слоях торфа накапливаются значительные массовые доли тяжелых структур полиаренов. Такое явление обусловлено активным разложением при высоких температурах богатых лигнином трав и древесных видов. Затем в период похолодания синтезированные ПАУ консервируются в слоях многолетней мерзлоты. В период невысоких температур суббореального периода разложение трав и деревьев происходит в меньшей степени и соответственно ПАУ в торфе содержатся в меньших количествах, а в приповерхностных слаборазложившихся слоях торфа его состав определяется составом ПАУ растений, доминирующих в растительном покрове болота и характеризуется незначительным количеством низкомолекулярных ПАУ.

Если формирование болота в атлантический период проходит по верховому типу, пикового накопления тяжелых ПАУ в торфяных слоях не происходит в связи со слабой способностью мхов – доминантов ботанического состава торфа – к разложению и низким содержанием в них лигнина. В условиях появления в ботаническом составе торфа на всех этапах его формирования травянистых видов четко выражено некоторое увеличение содержания 5–6-ядерных структур ПАУ. Для современных торфяных слоев характерно низкое содержание ПАУ, обусловленное составом ПАУ растений.

Торфяник, сформированный в суббореальный период по верховому типу, отличался отсутствием максимумов накопления ПАУ, разложение моховой растительности проходило медленно с образованием главным образом низкомолекулярных структур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование накопления ПАУ в торфяниках трех природных зон позволило выявить общие закономерности распределения ПАУ в торфе. В верхней части профиля состав ПАУ торфа определяется составом ПАУ доминирующей растительности, о чем свидетельствуют высокие значения коэффициентов корреляции распределения ПАУ в растениях-доминантах ботанического состава торфа и его верхних слоях. Постепенное разложение растительных остатков, главным образом травянистых и древесных видов, обогащенных лигнином, приводит к новообразованию в торфе тяжелых структур полиаренов, отсутствующих в составе растений. Как следствие при возрастании степени разложения торфа коэффициенты корреляции состава ПАУ торфа и растений уменьшаются. В горизонтах торфа с повышенной долей трав и древесных растений в ботаническом составе и высокой степени разложения проявляются максимумы накопления тяжелых полиаренов.

На всех исследуемых участках выявлено уменьшение содержания ПАУ в верхних слоях многолетней мерзлоты. Содержание полиаренов в горизонтах многолетней мерзлоты определяется историческими особенностями формирования торфяников. В слоях торфяников, сформировавшихся в период климатического оптимума голоцена в условиях избыточного увлажнения, выявлены пиковые значения содержания 5–6-ядерных структур ПАУ, главным образом бенз[ghi]перилена. К данной группе относятся торфяники лесотундры и торфяники уч. 26 в южной тундре, а также торфяник бугра северной тундры. Для торфяников, сформировавшихся как верховое или переходное болото (торфяники уч. 2а в южной тундре), повышенных концентраций бенз[ghi]перилена не обнаружено. Также не выявлено пиковых значений тяжелых ПАУ в мочажине побережья Баренцева моря, что во многом связано с формированием данной мочажины в суббореальный период.

Возможная причина уменьшения содержания ПАУ в торфяниках от лесотундры и южной тундры к северной тундре, это понижение биологически активных температур почв. Высокомолекулярные ПАУ образуются в результате трансформации лигнина, который является продуктом интенсивного разложения травянистых и древесных растений. В природе лигнин наиболее эффективно разлагается базидиомицетами из группы “грибов белой гнили”, развитию которых препятствуют низкие температуры.

Для всех исследуемых торфяников выявлена тенденция обратной зависимости в накоплении нафталина и бенз[ghi]перилена, что вероятно объясняется изменением кормовой стратегии микроорганизмов, которые при отсутствии легкодоступных веществ, таких как легкие ПАУ, начинают разлагать высокомолекулярные органические соединения торфа, в результате чего образуются тяжелые структуры ПАУ, которые в дальнейшем могут окисляться до более легких структур.

Установлено, что растения фоновых ключевых участков довольно близки по составу полиаренов. Статистически подтверждено, что количественные различия для большинства индивидуальных ПАУ в растениях одного вида для разных подзон не значимы. Данный факт позволяет экстраполировать данные по составу ПАУ исследованных растений на другие фоновые бугристые болота, при предположении, что они будут характеризоваться сходным качественным и количественным составом полиаренов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках госзадания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме “Криогенез как фактор формирования и эволюции почв арктических и боре-

альных экосистем европейского Северо-Востока в условиях современных антропогенных воздействий, глобальных и региональных климатических трендов”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

У авторов нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Рис. S1. Ботанический состав торфа торфяной олиготрофной (мерзлотной) почвы бугров лесотундры.

Рис. S2. Ботанический состав торфа торфяной олиготрофной почвы мочажин лесотундры.

Рис. S3. Ботанический состав торфа торфяной олиготрофной (мерзлотной) почвы бугров южной тундры (участок 2а).

Рис. S4. Ботанический состав торфяной олиготрофной (мерзлотной) почвы мочажин южной тундры (участок 2а).

Рис. S5. Ботанический состав торфа торфяной олиготрофной (мерзлотной) почвы бугров южной тундры (участок 2б).

Рис. S6. Ботанический состав торфа торфяной олиготрофной (мерзлотной) почвы мочажин южной тундры (участок 2б).

Рис. S7. Ботанический состав торфа торфяной олиготрофной (мерзлотной) почвы бугров северной тундры.

Рис. S8. Ботанический состав торфа торфяной олиготрофной (мерзлотной) почвы мочажин северной тундры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Василевич Р.С., Безносиков В.А., Лодыгин Е.Д.* Молекулярная структура гумусовых веществ мерзлотных бугристых торфяников лесотундры // Почвоведение. 2019. № 3. С. 317–329.
2. *Габов Д.Н., Яковлева Е.В., Василевич Р.С., Кузнецов О.Л., Безносиков В.А.* Полициклические ароматические углеводороды в мерзлотных бугристых торфяниках криолитозоны // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1049–1062.
3. *Головацкая Е.А., Никонова Л.Г.* Разложение растительных остатков в торфяных почвах олиготрофных болот // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2013. № 3(23). С. 137–151. <https://doi.org/10.17223/19988591/23/13>
4. *Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Цибарт А.С., Смирнова М.А.* Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение (обзор) // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1195–1209.
5. Геокриологическая карта СССР, масштаб 1 : 2.5 млн / Под ред. Е.Д. Ершова, К.А. Кондратьева. М.: Министерство геологии СССР и МГУ, 1998.
6. *Дымов А.А., Дубровский Ю.А., Габов Д.Н.* Пирогенные изменения подзолов иллювиально-железистых (средняя тайга, Республика Коми) // Почвоведение. 2014. № 2. С. 144–154.
7. *Дымов А.А., Дубровский Ю.А., Жангуров Е.В., Габов Д.Н., Низовцев Н.А.* Влияние пожара в северо-таежном ельнике на органическое вещество почвы // Лесоведение. 2015. № 1. С. 52–62.
8. *Елин Е.С.* Фенольные соединения в биосфере. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 392 с.
9. *Жидкин А.П., Геннадиев А.Н., Кошовский Т.С.* Поступление и поведение полициклических ароматических углеводородов в пахотных, залежных и лесных почвах таежной зоны (Тверская область) // Почвоведение. 2017. № 3. С. 311–320.
10. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
11. *Несмеянов А.Н., Несмеянов Н.А.* Начала органической химии. М.: Химия, 1970. 824 с.
12. *Орлов Д.С.* Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 325 с.
13. *Пастухов А.В., Каверин Д.А., Габов Д.Н.* Полициклические ароматические углеводороды в мерзлотных бугристых торфяниках на европейском Северо-Востоке // Почвоведение. 2017. № 7. С. 814–823.
14. *Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А.* Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 224 с.
15. *Феофилова Е.П., Мысякина И.С.* Лигнин: химическое строение, биодеградация, практическое использование // Прикладная биохимия и микробиология. 2016. Т. 52. № 6. С. 559–569.
16. *Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Безносиков В.А.* Влияние различных доз бенз[а]пирена на состав полициклических ароматических углеводородов в песчаной культуре // Агрохимия. 2015. № 6. С. 90–96.
17. *Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Василевич Р.С., Гончарова Н.Н.* Участие растений в формировании состава полициклических ароматических углеводородов торфяников // Почвоведение. 2020. № 3. С. 1–14.
18. *Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Панюков А.Н.* Аккумуляция полиаренов в растениях бугристых торфяников побережья баренцева моря // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1316–1327.
19. *Alagic S.C., Maluckov B.S., Radojicic V.B.* How can plants manage polycyclic aromatic hydrocarbons? May these effects represent a useful tool for an effective soil remediation? A review // Clean technologies and environmental policy. 2015. V. 17. № 3. P. 597–614. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0840-6>
20. AMAP Assessment 2016: Chemicals of Emerging Arctic Concern. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. Narayana Press, Gylling, 2017.
21. *Asemaninejada A., Greg Thorna R., Branfireuna B.A., Lindoa Z.* Climate change favours specific fungal communities in boreal peatlands // Soil Biology and Biochemistry. 2018. V. 120. P. 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.029>
22. *Atanassova I., Brummer G.W.* Polycyclic aromatic hydrocarbons of anthropogenic and biopedogenic origin in a colluviated hydromorphic soil of Western Europe // Geo-

- derma. 2004. V. 120. P. 27–34.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.08.007>
23. *Belis C.A., Offenthaler I., Weiss P.* Semivolatiles in the forest environment: the case of PAHs // *Plant Ecophysiology*. 2001. V. 8. P. 47–73.
 24. *Berset J.D., Kuehne P., Shotyk W.* Concentrations and distribution of some polychlorinated biphenyls PCBs and polycyclic aromatic hydrocarbons PAHs in an ombrotrophic peat bog profile of Switzerland // *The Science of the Total Environment*. 2001. V. 267. P. 67–85.
[https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00763-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00763-4)
 25. *Campos I., Abrantes N., Pereira P., Micaelo A.C., Vale C., Keizer J.J.* Forest fires as potential triggers for production and mobilization of polycyclic aromatic hydrocarbons to the terrestrial ecosystem // *Land Degradation & Development*. 2019. V. 30. P. 2360–2370.
<https://doi.org/10.1002/ldr.3427>
 26. *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. № 1. P. 53–64.
<https://doi.org/10.15244/pjoes/81686>
 27. *DiDonato N., Chen H., Waggoner D., Hatcher P.G.* Potential origin and formation for molecular components of humic acids in soils // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2016. V. 178. P. 210–222.
<https://doi.org/10.16-j.gca.2016.01.013>
 28. *Dijk C., Doorn W., Alfén B.* Long term plant biomonitoring in the vicinity of waste incinerators in the Netherlands // *Chemosphere*. 2015. V. 122. P. 45–51.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.11.002>
 29. *Escalante-Espinosa E., Rodríguez-García L., Gutiérrez-Rojas M. M.* PAH removal by two native tropical plants cultured on model contaminated soil // *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Pollution, Health Effects and Chemistry*. N.Y.: Nova science publishers, 2011. P. 309–320.
 30. FAO and IUSS 2015. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps – Update 2015. FAO, Rome. 203 p.
 31. *Gabov D.N., Beznosikov V.A., Yakovleva E.V.* Accumulation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Hummocky Tundra Peatlands under Climate Change at High Latitudes // *Geochemistry International*. 2017. V. 55. P. 737–751.
<https://doi.org/10.1134/S0016702917060039>
 32. *Gabov D.N., Yakovleva Ye.V., Vasilevich R.S.* Vertical distribution of PAHs during the evolution of permafrost peatlands of the European arctic zone // *Applied Geochemistry*. 2020. V. 123. P. 104790.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104790>
 33. *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.
 34. *Guo Z., Kang Y., Hua Z., Lianga S., Xie H., Ngo H.H., Zhang J.* Removal pathways of benzofluoranthene in a constructed wetland amended with metallic ions embedded carbon // *Bioresource Technology*. 2020. V. 311. № 123481.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123481>
 35. *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. V. 619–620. P. 165–175.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.080>
 36. *Kang F., Chen D., Gao Y., Zhang Y.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in subcellular root tissues of ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) // *BMC Plant Biol*. 2010. V. 10. № 210.
 37. *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. № 1. P. 143–154.
 38. *Labana S., Kapur M., Malik D., Prakash D., Jain R.* Diversity, Biodegradation and bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons // *Environ. Bioremediation Technol*. 2007. P. 409–443.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-34793-4_18
 39. *Li Q.Q., Li Y.G., Zhu L.Z., Xing B.S., Chen B.L.* Dependence of Plant Uptake and Diffusion of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Leaf Surface Morphology and Microstructures of Cuticular Waxes // *Scientific Reports*. 2017. V. 7. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1038/srep46235>
 40. *Li Y., Zang S., Zhang K., Sun D., Sun L.* Occurrence, sources and potential risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in a permafrost soil core, northeast China. *Ecotoxicology*. 2020.
<https://doi.org/10.1007/s10646-020-02285-2>
 41. *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. V. 598. P. 553–561.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.103>
 42. *Malawska M., Bojakowska I., Wilkomirski B.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in peat and plants from selected peat-bogs in the north-east of Poland // *J. plant nutrition and soil science*. 2002. V. 165. № 6. P. 686–691.
<https://doi.org/10.1002/jpln.200290004>
 43. *Malawska M., Ekonomiuk A.* The use of wetlands for the monitoring of non-point source air pollution // *Polish J. environmental studies*. 2008. V. 17. № 1. P. 57–70.
 44. *Masclat 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. № 19. P. 3195–3207.
[https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00196-x](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00196-x)
 45. *Mętrak M., Aneta E., Wilkomirski B., Staszewski T., Suska-Malawska M.* Interspecific differences in foliar PAHs load between Scots pine, birch, and wild rosemary from three polish peat bogs // *Environ Monit Assess*. 2016. V. 188. № 456.
<https://doi.org/10.1007/s10661-016-5465-2>
 46. *Migaszcwski Z.M., Gałuszka A., Crock J.G., Lamothe P.J., Dołęgowska S.* Interspecies and interregional comparisons of the chemistry of PAHs and trace elements in mosses Hy-

- locomium splendens (Hedw.) B.S.G. and Pleurozium schreberi (Brid.) Mitt. from Poland and Alaska // *Atmospheric Environment*. 2009. V. 43. P. 1464–1473. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.11.035>
47. Nemirovskaya I.A., Novigatskii A.N. Hydrocarbons in the snow and ice cover and waters of the Arctic Ocean // *Geochemistry international*. 2003. V. 41. № 6. P. 585–594.
 48. Radić S., Medunić G., Kuhari Z., Roje V., Maldini K., Vujčić V., Kriohlavek A. The effect of hazardous pollutants from coal combustion activity: Phytotoxicity assessment of aqueous soil extracts // *Chemosphere*. 2018. V. 199. P. 191–200. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.008>
 49. Ren A. Environmental Pollutants and Neural Tube Defects // *Reproductive and Developmental Toxicology (Second Edition)*. 2017. V. 61. P. 1139–1166.
 50. Rey-Salgueiro L., Martínez-Carballo E., Merino A., Vega J.A., Fonturbel M.T., Simal-Gandara J. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Organic Horizons Depending on the Soil Burn Severity and Type of Ecosystem // *Land Degradation & Development. Special Issue: Ash and fire, char, and biochar in the environment*. 2018. V. 29. P. 2112–2123. <https://doi.org/10.1002/ldr.2806>
 51. Schneidmesser E., Schauer J.J., Shafer M.M., Hagler G.S., Bergin M.H., Steig E.J. A method for the analysis of ultra-trace levels of semi-Volatile and non-Volatile organic compounds in snow and application to a Greenland snow pit // *Polar Science*. 2008. V. 2. P. 251–266. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2008.08.004>
 52. Sibi D., Ingletta P.W., Inglett K.S. Warming rate drives microbial nutrient demand and enzyme expression during peat decomposition // *Geoderma*. 2019. V. 336. P. 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.027>
 53. Tarafdar A., Sinha A. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution Generated from Coal-Fired Thermal Power Plants: Formation Mechanism, Characterization, and Profiling // *Pollutants from Energy Sources. Energy, Environment, and Sustainability*. Singapore: Springer, 2018. P. 73–90. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3281-4_5
 54. Treseder K.K., Marusenko Y., Romero-Olivares A.L., Maltz M.R. Experimental warming alters potential function of the fungal community in boreal forest // *Glob Chang Biol*. 2016. V. 22. № 10. P. 3395–3404. <https://doi.org/10.1111/gcb.13238>
 55. Ugwu K.E., Ukoah P.O. Analysis and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil and plant samples of a coal mining area in Nigeria // *Bul. Environmental Contamination Toxicology*. 2016. V. 96. P. 383–387. <https://doi.org/10.1007/s00128-016-1727-5>
 56. 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. V. 449. P. 81–94. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.043>
 57. 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 // *J. Soils Sediments*. 2019. V. 19. P. 1735–1744. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2178-x>
 58. Wang J., Bao H., Zhang H., Li J., Hong H., Wu F. Effects of cuticular wax content and specific leaf area on accumulation and partition of PAHs in different tissues of wheat leaf // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. V. 27. P. 18793–18802. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08409-9>
 59. Wilcke W. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil – a review // *J. Plant Nutr. Soil Sci*. 2000. V. 163. P. 229–248. [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200006\)163:3<229:AID-JPLN229>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200006)163:3<229:AID-JPLN229>3.0.CO;2-6)
 60. Yakovleva E.V., Gabov D.N., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M., Aniskina M.V. Biological effects induced by benzopyrene in soil and plants. Pyrene: Chemical Properties, Biochemistry Applications and Toxic Effects // *Pyrene: Chemical Properties, Biochemistry Applications and Toxic Effects*. N.Y.: Nova science publishers, 2013. P. 1–41.
 61. 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. V. 37. P. 203–218. <https://doi.org/10.1080/10406638.2016.1244089>
 62. Yakovleva E.V., Gabov D.N. Polyarenes accumulation in tundra ecosystem influenced by coal industry of Vorkuta // *Polish journal research*. 2020. V. 41. № 3. P. 237–267. <https://doi.org/10.24425/ppr.2020.134122>

Formation of the Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition in Hummock Bogs in the Forest-Tundra–Northern Tundra Zonal Series

E. V. Yakovlev¹*, D. N. Gabov¹, and R. S. Vasilevich¹

¹ Institute of Biology of Komi Science Center Ural Branch of Russian Academy of Science, Syktyvkar, 167982 Russia

*e-mail: kaleeva@ib.komisc.ru

Here, we studied accumulation of polycyclic aromatic compounds in plants and peat of three natural sub-zones: forest-tundra, southern tundra and northern tundra. The polyarenes content was estimated by high performance liquid chromatography. The absence of statistically significant differences in the accumulation

of PAHs by plants of the same species in the studied ecotones provides the possibility of extrapolating the data on the PAH composition of the studied plants to other background bogs. Dominant vegetation effects on the PAH profile in the upper peat layers. We found high correlations between PAHs in dominant plant species and peat PAHs. The gradual decomposition of herbaceous and woody residuals enriched with lignin led to the formation of heavy structures of polyarenes in peat, which were absent in the composition of plants. The correlations were lower in the deeper layers of more decomposed peat. For all studied peatlands, an inverse relationship was revealed in the accumulation of naphthalene and benzperylene and a decrease in the PAH content in the upper layers of permafrost. The content of polyarenes in the layers of permafrost was determined by the historical features of the formation of peatlands. We found peak values of 5–6 ring PAH structures mainly benz[ghi]perylene in the peat layers formed during the climatic optimum of Holocene under overlogging. No elevated concentrations of benz[ghi]perylene were found for peat bogs that formed as a bog or transitional bog and that arose in the Subboreal period. A decrease in soil temperatures when moving from south to north is considered as a probable reason for the decrease in the PAH content in peatlands from the forest-tundra and southern tundra to the northern tundra.

Keywords: marsh plants, peat, polycyclic aromatic hydrocarbons, Fibric Floatic Cryic Histosol, Fibric Folic Cryic Histosol