

Накопление полиаренов в почвах и растениях южной тундры под действием процессов добычи и сжигания угля

© 2020. Е. В. Яковлева, к. б. н., н. с., Д. Н. Габов, к. б. н., с. н. с.,
Институт биологии Коми научного центра УрО РАН,
167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: kaleeva@ib.komisc.ru

Проведены исследования содержания полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в органических горизонтах тундровых почв и растениях южной тундры под воздействием предприятий по добыче и сжиганию угля. Установлено, что почвы, лишайники и мхи тундровых фитоценозов в большей степени загрязнены ПАУ в зонах воздействия шахты. Максимум содержания ПАУ в зоне действия шахты приходился на расстояние 0,5 км, в зоне действия ТЭС – 1 км от источника. Показаны сходные закономерности накопления полиаренов почвами и исследованными видами растений под действием процессов добычи и сжигания угля. Для мхов, лишайников, листьев и ветвей *Betula nana* L. в условиях загрязнения минимальное накопление ПАУ на поверхности выявлено при максимальном общем содержании ПАУ в растениях. Снижение количества полиаренов, поступающих на поверхность, приводило к снижению уровня их биоаккумуляции. В качестве индикаторов загрязнения тундровых фитоценозов ПАУ рекомендуется использовать мох *Pleurozium schreberi* для диагностики длительного воздействия и листья *B. nana* для оценки краткосрочных изменений в содержании ПАУ.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды, южная тундра, почва, растения, угольная шахта, теплоэлектростанция.

Accumulation of polyarenes in soils and plants of the south tundra zone affected by coal mining and thermal power plant

© 2020. E. V. Yakovleva ORCID: 0000-0003-0793-1468
D. N. Gabov ORCID: 0000-0002-3786-9872
Institute of Biology of Komi SC UrB RAS,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: kaleeva@ib.komisc.ru

The content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the organic soil horizons and plants of the south tundra zone has been studied in the areas affected by coal mining and coal thermal power plant (TPP). The soils, mosses, and lichens of tundra phytocenoses are discovered to be more polluted by polyarenes in the coal mining areas. The same pollution levels are defined for dwarf shrubs and shrubs in the mining area and near the power station. The highest PAHs distribution level is observed at a distance of 0.5 km from the Vorkutinskaya mine and 1 km from the power station. The diagnostic ratio fluoranthene/chrysene and fluoranthene/benzo[b]fluoranthene in the *Pleurozium schreberi* lichen mosses is suggested to use for defining of the polyarene origin in the tundra ecosystems. The same polyarenes accumulation is found in the soils and plants under the influence of coal mining and burning. The surface PAHs contamination is minimal when general PAHs content is maximal for mosses, lichens, and *Betula nana* L. leaves and branches in the polluted areas. With polyarenes inflow decreasing their bioaccumulation level in the plants also reduces. The moss *Pleurozium schreberi* is recommended to be used as a pollution indicator of tundra phytocenoses with different PAHs and leaves of *B. nana* – for assessment of short-time changes in content of polyarenes. The general content rather than the surface accumulation data are better to apply in the monitoring studies, because the surface accumulation data are more variable.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons, southern tundra, soil, plants, coal mine, thermal power plant.

Тундровые экосистемы наряду с высоким ресурсным потенциалом характеризуются низкой устойчивостью к антропогенным воздействиям. В тундровой зоне Европейского Северо-Востока России широко распространена добыча каменного угля и использование его как топлива. Воркута – центр угольной промышленности, вблизи сконцентрировано шесть угольных шахт и две ТЭС, работающих на угле, что ведёт к негативным изменениям в почвенном и растительном покрове. Приоритетными загрязнителями, образующимися при добыче и сжигании угля, являются полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) [1]. ПАУ характеризуются токсичными, мутагенными и канцерогенными свойствами по отношению к живым организмам [2–5], их принято разделять на лёгкие – 2–4 ядерные, и тяжёлые 5–6 ядерные. ПАУ, поступающие в атмосферу из разных источников, попадают на поверхность растений, активно аккумулируясь в них, и в дальнейшем мигрируют и накапливаются по всей пищевой цепи [6].

К настоящему времени в литературе имеются данные о влиянии разных промышленных источников ПАУ на объекты окружающей среды [7–10]. Исследования содержания ПАУ в органогенных горизонтах почв, мхах и сосудистых растениях вблизи ТЭС, расположенной на архипелаге Шпицберген [9] показали, что наиболее чувствительным индикатором загрязнения ПАУ является сообщество мхов с круглогодичным вегетационным периодом. Показаны тесные корреляции между содержанием полиаренов в почвах и растениях в зоне действия ТЭС. Сходные данные получены для зоны воздействия Новочеркасской ГРЭС, работающей на угле и природном газе. Установлено, что загрязнению бенз[а]пиреном наиболее подвержены почвы и травянистые растения 5 км зоны на северо-запад от ГРЭС [1, 11]. Наибольшей способностью к биоаккумуляции отличалась корневая часть травянистых растений, что совпадает с нашими данными для травянистых растений в зоне действия шахт «Воркутинская» и «Юнь-яга». Наши исследования показали, что в почвах и растениях как загрязнённых, так и контрольных участков лёгкие ПАУ были более распространены [12].

В настоящее время, наряду с присутствием большого массива информации по накоплению ПАУ почвами под действием различных промышленных источников [1, 14, 15], исследованию аккумуляции ПАУ растениями уделяется мало внимания. При этом растения,

как первые звенья трофических цепей, могут служить чувствительными индикаторами загрязнения, что особенно важно для тундровых фитоценозов, характеризующихся слабой способностью к восстановлению.

Целью данной работы было выявить особенности накопления ПАУ органогенными горизонтами почв и растениями южной тундры под действием угледобывающей и углеперерабатывающей промышленности.

Материалы и методы

В ходе работы исследовали содержание ПАУ в органогенных горизонтах тундровых почв и растениях южной тундры под воздействием предприятий по добыче и сжиганию угля. Почвы и растения отбирали в районе действия ТЭС-2 и шахты «Воркутинская» на расстоянии 0,5; 1,0 и 1,5 км от источников эмиссии в северо-восточном направлении, с учётом приоритетного направления ветров. Одновременно проводили отбор растений и смешанных проб почв органогенных горизонтов с 3 типичных площадок площадью 1 м². Исследованные типы почв тундровая поверхностно-глеевая (0,5 км от шахты «Воркутинская»; 0,5, 1 и 1,5 км от ТЭС), сухоторфяная мерзлотная почва бугров (1,0 км от шахты), тундровая торфянисто-глеевая (1,5 км от шахты). Исследованы виды растений трёх групп: лишайники рода *Peltigera*: *Peltigera leucophlebia* (Nyl.) Gyeln. (шахта) и *P. rufescens* (Weiss) Humb. (ТЭС), мох – *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., кустарник – *Betula nana* L. Мхи при анализе разделяли на отмершую и живую часть, кустарники на листья, ветви, кору, стебли и корни.

Химико-аналитические исследования выполнены в ЦКП «Хроматография» ИБ ФИЦ Коми НЦУрО РАН. Определение ПАУ в растениях и почве проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на жидкостном хроматографе «Люмахром». ПАУ в почвах были определены по методике ПНД Ф 16.1:2:2.2:3.39-03. Методика определения ПАУ в растениях описана в работе [13]. Для исследованных выборок с помощью теста Колмогорова-Смирнова установлено нормальное распределение. Статистическую обработку проводили при помощи *t*-критерия Стьюдента, $P = 0,95$. Полученные данные сравнивали с результатами для фонового участка, расположенного в 6 км от ст. Хановей. Данные по содержанию ПАУ в почвах и растениях фонового участка были опубликованы ранее [13].

Результаты и обсуждение

Сравнение накопления полиаренов в органических горизонтах почв зоны действия ТЭС и шахты «Воркутинская» показало, что содержание всех ПАУ было выше под действием угледобычи, по сравнению с последствиями сжигания угля. Для общего содержания кратности составляли 2–3 раза для суммы ПАУ и суммы лёгких ПАУ и 1–3 раза для тяжёлых структур. На расстоянии в 1 км от предприятий наблюдали наименьшие кратности превышения, так как максимум распространения ПАУ в зоне действия ТЭС приходился на расстояние в 1 км от источника, под влиянием шахты «Воркутинская» на 0,5 км. Возможно, оседание тяжёлых ПАУ на более далёких расстояниях связано с высотой трубы ТЭС. Кроме того, при сжигании угля образуются частицы меньшего размера по сравнению с частицами угольной пыли и ПАУ на них могут интенсивнее перемещаться. Лёгкие ПАУ, предположительно, могли перемещаться ещё дальше, и максимум их присутствия мог бы быть отмечен на 3–5 км от ТЭС. Данные о преимущественном оседании ПАУ вблизи источника были получены и другими авторами, и объяснялись особенностями рельефа [9, 10]. При исследовании накопления бенз[а]пирена в почвах под воздействием Новочеркасской ГРЭС [1], максимум накопления ПАУ в почвах был

выявлен на удалении 1,6 км от источника, в то время как на расстоянии 1,2 км массовая доля ПАУ была ниже, что коррелирует с полученными нами данными.

Было выявлено, что на разных удалениях от предприятий наиболее характерной структурой для процессов добычи угля был флуорантен, для процессов сжигания угля – хризен и бенз[b]флуорантен. Коэффициенты корреляции состава ПАУ органических горизонтов почв в зоне действия разных предприятий составили $r = 0,96–0,99$ ($n = 3$), для мха *P. schreberi* $r = 0,99$ ($n = 3$), для лишайников рода *Peltigera* $r = 0,96–0,99$, для *B. nana* $r = 0,94–0,99$.

Превышение массовой доли индивидуальных ПАУ в растениях под действием шахты по сравнению с ТЭС было одинаково для отдельных видов и групп. Для *B. nana*, отличавшейся незначительным накоплением ПАУ в зоне действия обоих предприятий, не отмечено значимых превышений содержания ПАУ в зоне действия шахты, по сравнению с участками, подверженными влиянию ТЭС. Наивысшие кратности превышения характерны для расстояния 0,5 км и составляют 1,3 раза для общего содержания и для отдельных ПАУ. Содержание ПАУ в лишайниках рода *Peltigera* в зоне действия шахты в 2–3 раза выше, чем в зоне действия ТЭС, для большинства индивидуальных ПАУ и их общего содержания,

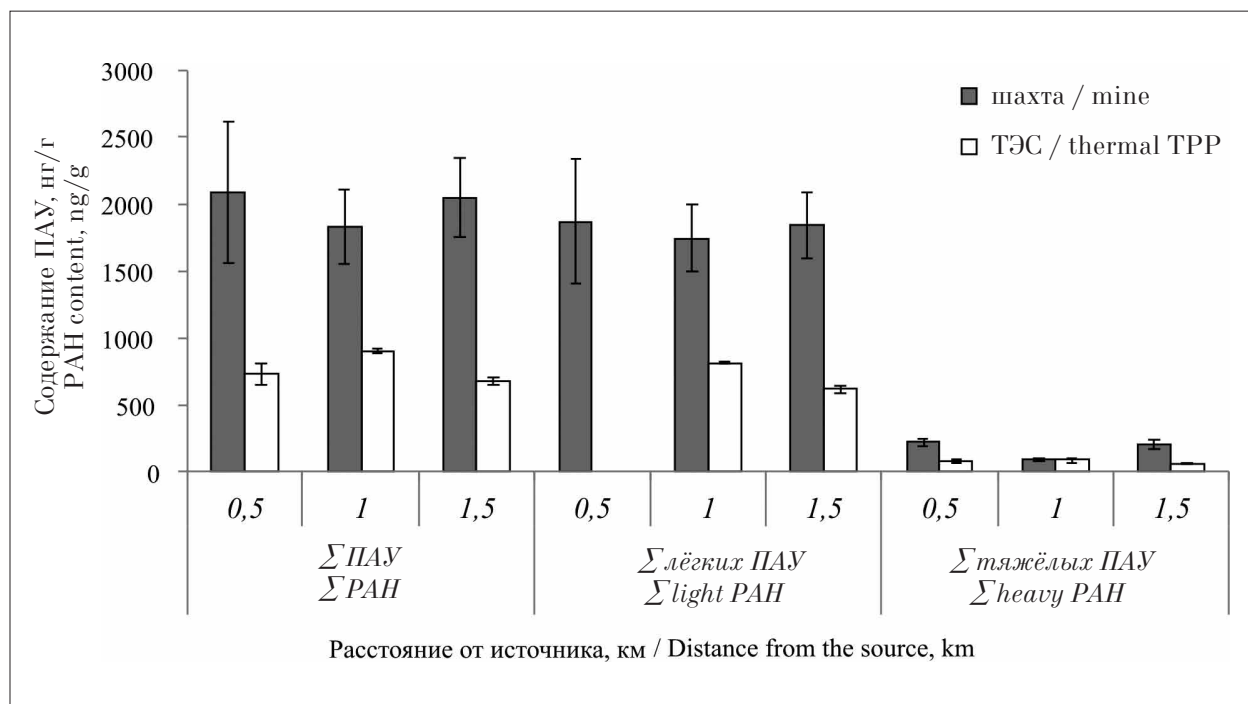


Рис. 1. Содержание ПАУ в органических горизонтах почв, нг/г
 Fig. 1. Content of PAH in organogenic horizons of soils, ng/g

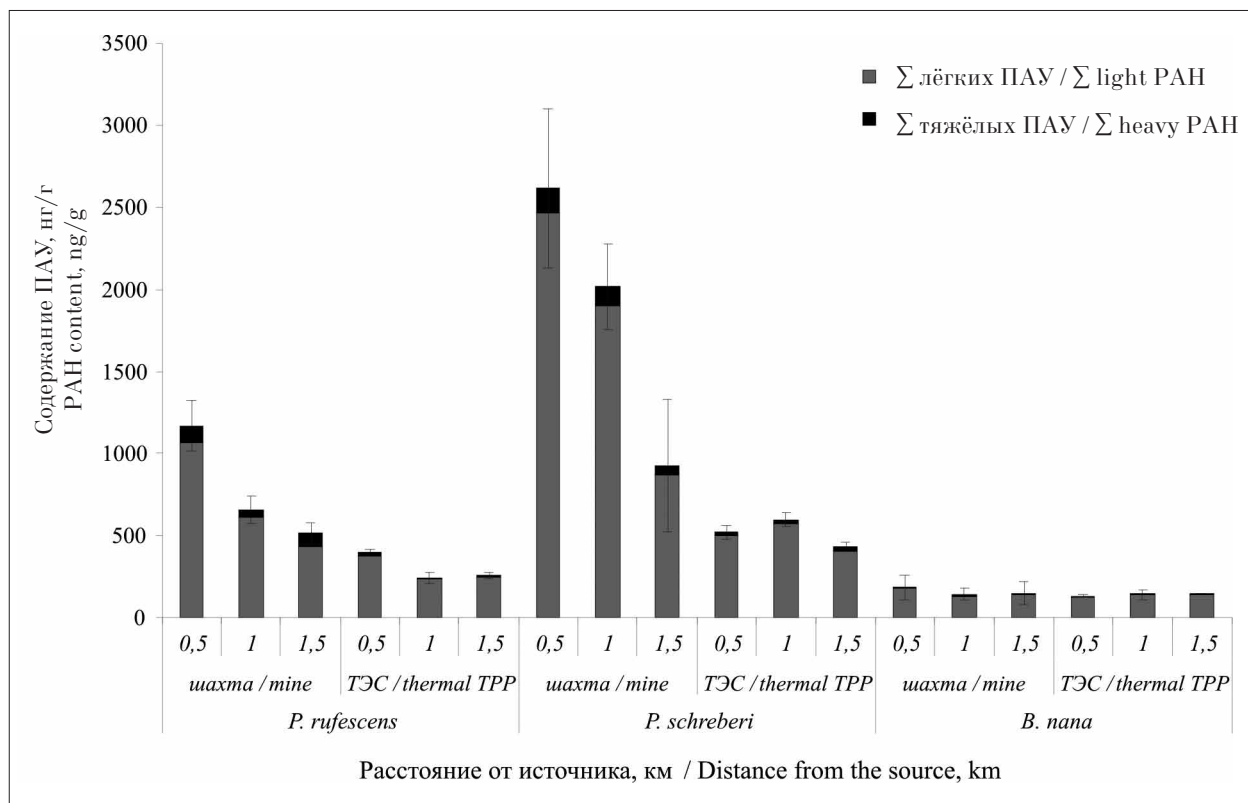


Рис. 2. Содержание ПАУ в растениях разных видов, нг/г
Fig. 2. Content of PAH in plants of different species, ng/g

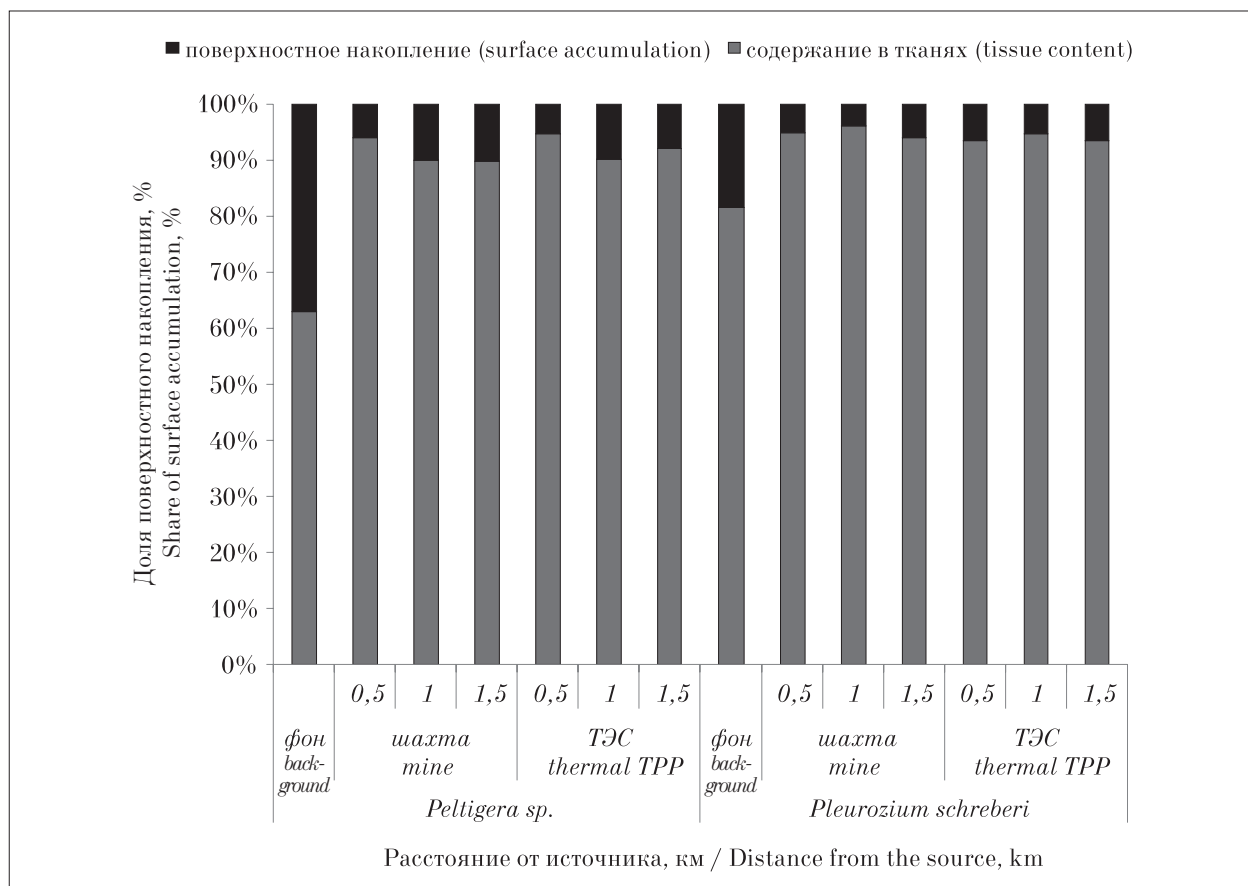


Рис. 3. Вклад поверхностного накопления в общее содержание ПАУ в растениях, %
Fig. 3. Contribution of surface accumulation to total PAH content in plants, %

для тяжёлых структур значения кратностей составляют 4–10 раз. Для мха *P. schreberi* под действием шахты, по сравнению с ТЭС, возросло количество 2–3- и 5–6-ядерных ПАУ. Кратности превышения содержания ПАУ во мхе зоны действия шахты, по сравнению с ТЭС, закономерно убывали по мере удаления от источников. Для видов рода *Peltigera* кратности превышения снижались с удалением в меньшей степени.

Массовая доля ПАУ на поверхности *B. nana*, мхов *P. schreberi* и лишайников рода *Peltigera* изменялась сходным образом с общим содержанием. Закономерности накопления ПАУ разными растениями под действием шахты и ТЭС были подобны (рис. 3).

Для лишайников рода *Peltigera* на фоновом участке характерны высокие количества ПАУ, главным образом, находящиеся на поверхности лишайников. Под действием разного рода источников ПАУ, они начинают активно проникать внутрь, при этом содержание на поверхности остаётся на фоновом уровне (ТЭС) или снижается (шахта), но его вклад в общее содержание ПАУ резко уменьшается. Мох

P. schreberi в естественных условиях не накапливал значительные количества ПАУ, полиарены концентрировались внутри растения и, по-видимому, могли синтезироваться в нём. В условиях загрязнения происходило активное поглощение ПАУ мхом, содержание на поверхности возрастало по сравнению с фоновым уровнем, но его вклад в общее содержание ПАУ снижался. Для мхов и лишайников в условиях загрязнения минимум поверхностного загрязнения совпадал с максимальным общим содержанием ПАУ, снижение уровня поступления ПАУ вело к снижению биоаккумуляции.

Для листьев и ветвей *B. nana* показаны сходные закономерности (рис. 4). На поверхности листьев фонового участка находилось 58% ПАУ, в условиях загрязнения доля поверхностного накопления снижалась до 18% в 0,5 км от ТЭС, до 27–28% – в 1 и 1,5 км, для зоны шахты отмечено снижение до 25–30%. Снижение поверхностного накопления по сравнению с фоновыми значениями было отмечено в меньшей степени и для ветвей *B. nana*.

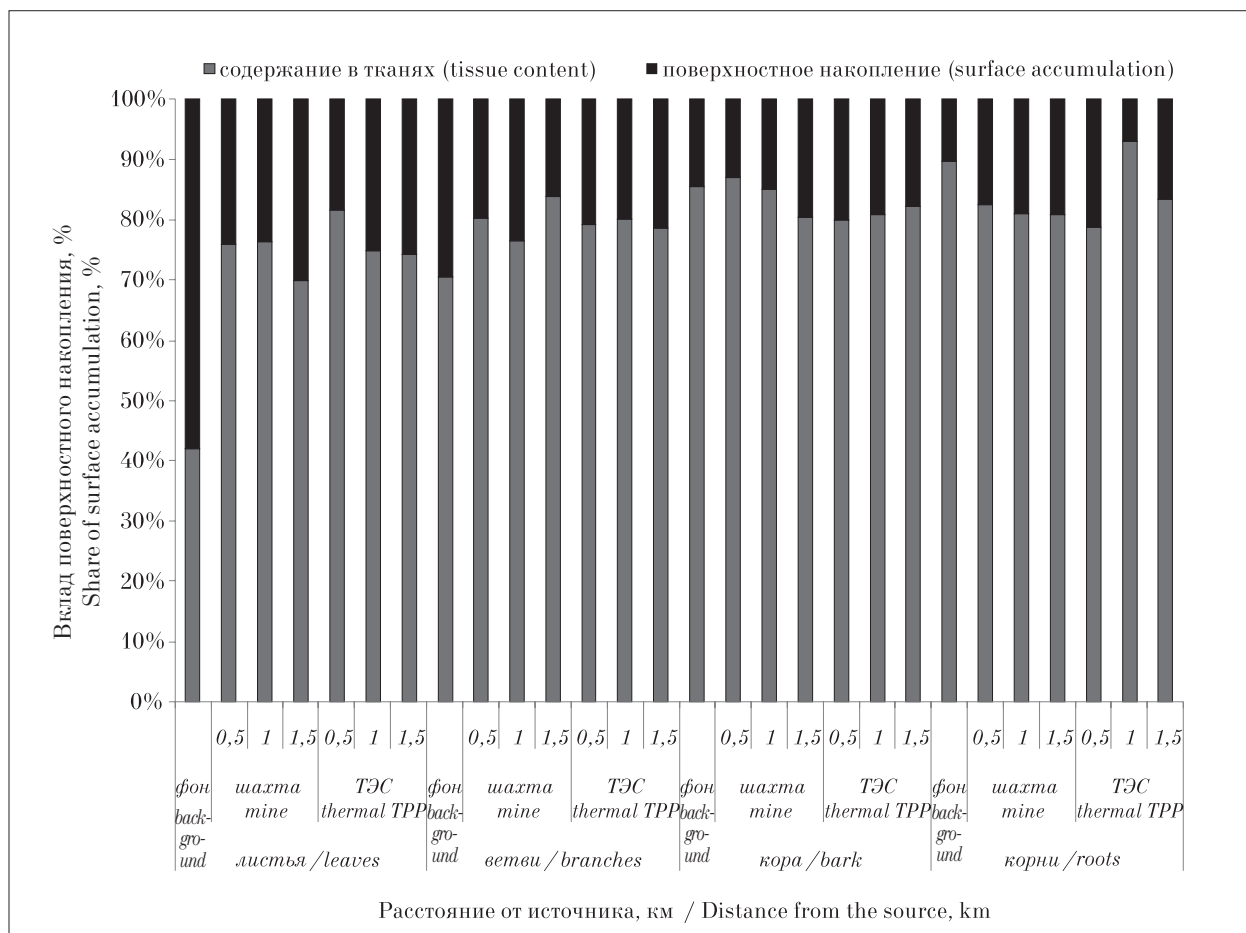


Рис. 4. Вклад поверхностного накопления в общее содержание ПАУ в *B. nana*, %
 Fig. 4. Contribution of surface accumulation to total PAH content in *B. nana*, %

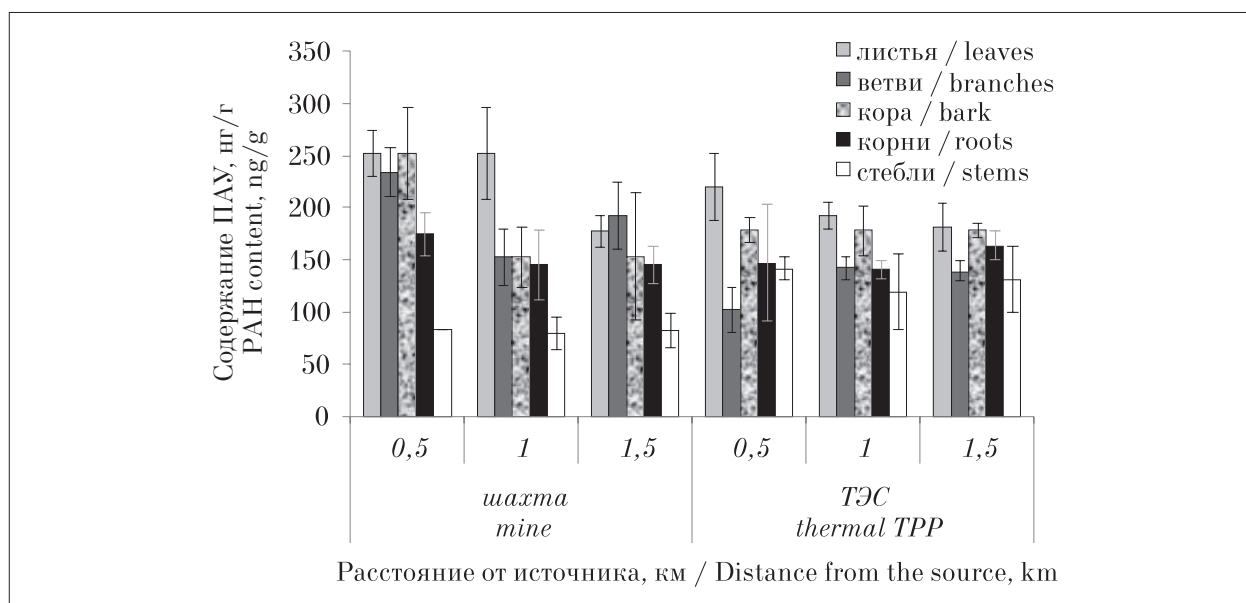


Рис. 5. Содержание ПАУ в органах *V. nana*, нг/г
 Fig. 5. The content of polyarenes in the organs of the *V. nana*, ng/g

Абсолютное содержание ПАУ на поверхности листьев и ветвей не значимо снижалось на расстоянии в 0,5 км по сравнению с большим удалением, при этом общее содержание ПАУ в 0,5 км было выше. ПАУ, попавшие на поверхность листьев и ветвей, активно транспортировались внутрь растения. По мере удаления от источника поступление ПАУ на поверхность снижалось, что привело к снижению интенсивности накопления и росту содержания ПАУ на поверхности наряду со снижением общего содержания ПАУ. Для коры и корней *V. nana* выявлена противоположная тенденция. Доля поверхностного содержания ПАУ для данных органов на фоновом участке была ниже по сравнению с загрязнёнными. Выявлено снижение вклада поверхностного накопления с удалением от источника, его приближение к фоновым значениям.

Сравнение накопления ПАУ различными видами растений в разных зонах аэротехногенного воздействия показало, что наивысшая способность к биоаккумуляции для обоих предприятий была характерна для *P. schreberi*, минимальным накоплением отличалась *V. nana* (рис. 2). Такой факт связан с коротким вегетационным периодом кустарников. Кроме того, известно, что мхи активно поглощают ПАУ всей поверхностью. Суммарное содержание полиаренов во мхе в условиях загрязнения ТЭС превышало массовую долю ПАУ в лишайнике в 1,3–2,5 раза, в кустарниках – в 3–4 раза. Для шахты «Воркутинская» эти значения составляют 2–3 и 6–14 раз соответственно.

Сравнение накопления ПАУ разными органами *V. nana* в условиях воздействия процессов добычи и сжигания угля показало, что на содержание ПАУ в органах не сказался источник выбросов, содержание ПАУ в одном и том же органе на одном расстоянии от ТЭС и шахты было примерно одинаковым. Значимое превышение содержания ПАУ вблизи шахты, над ТЭС было выявлено лишь в ветвях на расстоянии в 0,5 км от источников. Для поверхностного накопления ПАУ отдельными органами характерны сходные закономерности. Среди органов *V. nana* фоновых и загрязнённых участков наивысшая способность к биоаккумуляции была характерна для листьев.

Выявлено незначимое превышение содержания ПАУ в живой части *P. schreberi* на фоновом участке, и в отмершей части на загрязнённых. Для мха шахты «Воркутинской» максимальные кратности превышения содержания ПАУ в мёртвой части растения (1,5 раза) были выявлены в 0,5 км от источника, для ТЭС – в 1 и 1,5 км (1,2 раза), то есть на наиболее загрязнённых участках.

Заключение

Закономерности накопления ПАУ в почвах и растениях исследованных видов схожи в условиях загрязнения от добычи и сжигания угля, разница выражается в основном в количественных показателях уровня загрязнения, который был выше в зоне действия шахты для органогенных горизонтов почв, мхов и лишай-

ников. Сходный качественный состав ПАУ почв и растений на загрязнённых участках может быть связан с использованием угля шахты «Воркутинская» для функционирования ТЭС.

Значительная высота трубы ТЭС и более мелкие частицы, образующиеся при сжигании угольного топлива, на которых распространились полиарены, приводили к смещению максимального накопления ПАУ в почвах и растениях на расстояние в 1 км от ТЭС, по сравнению с 0,5 км вблизи шахты.

Мох *P. schreberi* представляется наиболее выгодным индикатором загрязнения тундровых фитоценозов ПАУ по ряду причин. *P. schreberi* является широко распространённым видом в тундровой зоне. Для мхов и органогенных горизонтов почв – основных депо ПАУ, выявлены сходные тенденции изменения содержания ПАУ. Мош *P. schreberi* активно аккумулирует полиарены, его применение даёт возможность проследить изменения уровня поступления ПАУ с удалением от источника выбросов. При мониторинге можно использовать как живую, так и отмершую часть мха, ввиду близкого содержания в них ПАУ. Использование *P. schreberi* при этом не позволяет проследить краткосрочные изменения в содержании ПАУ. В данном случае для оценки уровня загрязнения предлагается использовать листья *V. nana*.

Работа выполнена при финансовой поддержке госбюджетной темы № АААА–А17–117122290011–5.

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. 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. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.080
3. Aniskina M.V., Yakovleva E.V. Benz[a]pyrene destruction by *Elodea canadensis* L. in water // Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 3. P. 82–88 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-3-082-088
4. Li W., Chen B., Ding X. Environment and reproductive health in China: challenges and opportunities // Environmental Health Perspectives. 2012. V. 120. No. 5. P. A184–A185.
5. Yakovleva E.V., Gabov D.N., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M. Influence of benz[a]pyrene pollution on growth processes and structure of polyarenes in plants // Theoretical and Applied Ecology. 2015. No. 4. P. 45–51 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-4-045-051
6. 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 // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 2016. V. 96. P. 383–387. doi: 10.1007/s00128-016-1727-5
7. Gennadiev A.N., Zhidkin A.P., Pikovskii Y.I., Kovach R.G., Koshovskii T.S., Khlynina N.I. Hydrocarbon status of soils under atmospheric pollution from a local industrial source // Eurasian Soil Science. 2016. V. 49. No. 9. P. 1003–1012. doi: 10.1134/S1064229316090052
8. Doegowska S., Migaszewski Z.M. PAH concentration in the moss species *Hylocomium splendens* (Hedw.) B.S.G. and *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. from the Kielce area (south-central Poland) // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2011. V. 74. P. 1636–1644. doi: 10.1016/j.ecoenv.2011.05.011
9. Demin B.N., Graevskii A.P., Demeshkin A.S., Vlasov S.V. Pollution of soil-vegetation complex around Barentsburg Mine by polycyclic aromatic hydrocarbons // Arktika: Ecology and economics. 2012. No. 3 (7). P. 62–73 (in Russian).
10. 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
11. 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 Novocherkassk power station // Plodorodie. 2015. No. 6. P. 46–48 (in Russian).
12. Yakovleva E.V., Gabov D.N., Beznosikov V.A. Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in plants of the tundra zone at open coal mine // Vestnik instituta biologii Komi nauchnogo tsentra UrO RAN. 2016. No. 4. P. 24–33 (in Russian).
13. Yakovleva E.V., Gabov D.N. Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in plants of tundra affected by thermal power station in the vicinities of Vorkuta // Arktika: Ecology and economics. 2018. No. 2 (30). P. 18–30 (in Russian). doi: 10.25283/2223-4594-2018-2-18-30
14. Makovskaya T.I., Dyachkova S.G. Organic pollutants in soil-vegetative cover of the zone of sleeper industry influence // Vestnik Kras. GAU. 2009. No. 6. C. 67–72 (in Russian).
15. Mizwar A., Trihadiningrum Y. PAH contamination in soils adjacent to a coal-transporting facility in Tapin District, South Kalimantan, Indonesia // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 2015. V. 69. P. 62–68.