

УДК 630*27:630*114.53:625.77

ХВОЙНЫЕ ДЕРЕВЬЯ КАК БИОИНДИКАТОРЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИМИ АРОМАТИЧЕСКИМИ УГЛЕВОДОРОДАМИ

Михайлова Т.А., Шергина О.В., Калугина О.В., Тараненко Е.Н.

ФГБУН «Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения
Российской академии наук», Иркутск, e-mail: sherolga80@mail.ru

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) относятся к наиболее опасным для живых организмов техногенным поллютантам. В крупных городах одним из основных источников техногенных ПАУ являются выбросы автотранспорта. К таким городам принадлежит и Иркутск, где на автотранспорт приходится более 60% выбросов загрязняющих веществ. Цель данной работы – оценить уровень загрязнения территории города ПАУ по их накоплению в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.). Отбор проб хвои производился на 9 ключевых участках, расположенных вблизи улиц с наибольшей интенсивностью автотранспортных потоков. В хвое определяли суммарное содержание ПАУ и концентрацию 14 индивидуальных соединений. Показано выраженное загрязнение городской территории этими поллютантами, превышение фонового уровня ПАУ в хвое сосны составляло от 1,5 до 18 раз, в хвое лиственницы – от 5 до 17 раз. По процентной доле и по соотношению преобладают соединения, имеющие в структуре 3–4 ароматических кольца (фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз[а]антрацен, хризен), в то время как доля высокотоксичных соединений с 5–6 кольцами (бенз[б]флуорантен, бенз[к]флуорантен, бенз[е]пирен, бенз[а]пирен, перилен, индено[1,2,3-с,d]пирен, бензо[g,h,i]перилен, дибенз[а,h]антрацен) значительно ниже. Разное в количественном и качественном отношении загрязнение участков городской территории ПАУ является следствием влияния целого ряда факторов, в том числе локальной интенсивности автотранспортной нагрузки, скорости рассеивания загрязнённых потоков воздуха, частоты осадков, степени инсоляции и других. Несовпадения результатов по накоплению структурно разных ПАУ в хвое сосны и лиственницы, возможно, вызваны видовой анатомо-биохимической спецификой ассимиляционных органов этих тест-объектов.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), выбросы автотранспорта, биоиндикаторы, сосна обыкновенная, лиственница сибирская

CONIFERS AS BIOINDICATORS OF URBAN AREA POLLUTION BY POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS

Mikhailova T.A., Shergina O.V., Kalugina O.V., Taranenko E.N.

Siberian Institute of Plant Physiology & Biochemistry Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences, Irkutsk, e-mail: sherolga80@mail.ru

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are among the most toxic technogenic pollutants for living organisms. In large cities, one of the main sources of technogenic PAHs is motor vehicle emissions. Irkutsk also belongs to such cities, where motor transport accounts for more than 60% of pollutant emissions. The purpose of this work is to evaluate the level of PAHs pollution in the city territory by accumulation these pollutants in the needles of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.). Needles were sampled at 9 sample plots located near the streets with the highest intensity of traffic. In the needles, the total content of PAHs and the concentration of 14 individual compounds have been determined. The needles have been shown to accumulate a significant amount of PAHs. The excess of the background level PAHs in pine needles is from 1.5 to 18 times, in larch needles – from 5 to 17 times. Compounds having 3–4 aromatic rings (phenanthrene, anthracene, fluoranthene, pyrene, benz [a] anthracene and chrysene) prevail in the percentage and ratio, while the proportion of highly toxic compounds with 5–6 rings (benz[b]fluoranthene, benz[k]fluoranten, benz[e]pyrene, benz[a]pyrene, perylene, indeno[1,2,3-с,d]pyrene, benzo[g,h,i]perylene, dibenz[a,h]anthracene) is much lower. Differences in PAHs pollution in urban areas may be due to the influence of a number of factors, including the local intensity of the road load, the dispersion rates of polluted air flows, precipitation frequency, degree of insolation. The discrepancy between the results of the accumulation different PAHs in pine and larch needles is probably caused by the specific anatomical and biochemical characteristics of the assimilation organs of these test objects.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), urban area, bioindicators, Scots pine, Siberian larch

В современный период большинство городских территорий испытывают значительное воздействие такого негативного фактора, как техногенное загрязнение [1; 2]. В их числе и города Восточной Сибири, включая Иркутск, где индекс загрязнения воздушного бассейна соответствует высокому уровню [3]. В составе аэровыбро-

сов Иркутска постоянно присутствуют загрязняющие вещества разных классов токсичности, среди них и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), относящиеся к наиболее опасным для живых организмов [4]. Источники техногенных ПАУ – это все основные отрасли промышленности (металлургическая, не-

фтехимическая, коксохимическая, тепло-энергетика) и автотранспорт. В г. Иркутске именно на автотранспорт приходится основная доля (60% и более) выбросов загрязняющих веществ в общем их объёме [3]. По химическому строению ПАУ представляют собой высокомолекулярные органические соединения, отличающиеся количеством бензольных колец в структуре молекулы и способом их конденсации. ПАУ химически устойчивы и практически нерастворимы в воде [5]. Гидрофобность ПАУ обуславливает их способность проникать через биологические барьеры и накапливаться в клетках живых организмов. Это же свойство делает молекулы ПАУ труднодоступными для ферментных систем, участвующих в биодеградации ксенобиотиков. Токсичность ПАУ можно охарактеризовать как совокупность мутагенных, тератогенных и канцерогенных их свойств. При этом степень опасности индивидуальных ПАУ возрастает с увеличением молекулярной массы, а также при наличии в бензольном кольце алкильных или других заместителей. Поступающие с техногенными эмиссиями ПАУ могут распространяться во всех природных средах. В атмосферном воздухе эти вещества находятся в газообразном состоянии или в виде аэрозолей, сорбируясь на частицах пыли. В почве накопление ПАУ происходит при седиментации частиц пыли из атмосферного воздуха, при вымывании и выщелачивании из неконтролируемых отвалов и захоронений промышленных отходов. Установлена также интенсивная сорбция ПАУ снежным покровом.

Измерение концентраций ПАУ и других поллютантов в разных средах лежит в основе традиционных методов мониторинга загрязнения окружающей среды. Однако подобные методы имеют ряд технических ограничений, в то время как применение биологических индикаторов характеризуется определёнными преимуществами, например даёт возможность установить пространственное перемещение загрязнённых воздушных масс по результатам аккумуляции поллютантов в биологических объектах на разных расстояниях от источников эмиссий в течение конкретного временного промежутка. Кроме того, биологические индикаторы позволяют одновременно оценить негативный эффект загрязнения на биоту, в том числе проследить изменения в экосистемах [6]. При выборе биоиндикаторов мы руководствовались рядом

критериев, основным из которых является высокая чувствительность организма к воздействию техногенных поллютантов. С этих позиций в качестве биоиндикаторов предпочтительнее растительные организмы (продуценты), поскольку они обладают высокочувствительным к любым воздействиям фотосинтетическим аппаратом, которого нет у консументов и редуцентов. Нами в качестве биоиндикаторов выбраны два вида хвойных деревьев: сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) и лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.). Показано, что эти виды, помимо широкого распространения и важных лесообразующих функций, обладают высокой чувствительностью к техногенным поллютантам. При этом хвоя сосны обыкновенной может считаться универсальным биоиндикатором, поскольку характеризуется не только выраженными аккумулялирующими свойствами по отношению к органическим и неорганическим загрязнителям, но и является по существу всесезонным тест-объектом в отличие от опадающей на зиму хвои лиственницы. Значительные анатомические различия в строении покровных тканей хвои этих видов также могут обусловить специфику аэральное накопления загрязняющих веществ. Кроме того, по нашим данным, суммарное содержание ПАУ в хвое лиственницы даже на фоновых территориях довольно высоко в сравнении с хвоей сосны. Пока не ясно, является ли это результатом эндогенного синтеза ПАУ растительным организмом или следствием их поглощения из почвы, где они могут присутствовать в определённых концентрациях [5]. Тем не менее высокий фоновый уровень определяемых веществ в растении-индикаторе может привести к неоднозначным результатам в случае его применения для мониторинга поллютантов в природных объектах. Возможно, поэтому сведения, касающиеся использования хвои лиственницы для мониторинга загрязнения окружающей среды ПАУ, довольно редки. Между тем сравнительные исследования этих двух тест-объектов представляют научный и практический интерес, поскольку могут дать ответ на вопрос о возможности их взаимозаменяемости в мониторинге при определённых обстоятельствах. Например, при отсутствии одного из видов хвойных на территории обследования.

Цель данной работы: оценить уровень загрязнения территории крупного города техногенными ПАУ по накоплению

этих поллютантов в двух тест-объектах – хвое сосны обыкновенной и лиственницы сибирской.

Материалы и методы исследования

Полигоном исследований служила территория города Иркутска (Восточная Сибирь, 52°17'52" с.ш., 104°17'47" в.д.), имеющего развитую промышленную и транспортную инфраструктуру. Обследовались зелёные насаждения парков и лесопарков в разных районах города на 9 ключевых участках, расположенных вблизи улиц, характеризующихся значительной интенсивностью автотранспортных потоков: I – насаждения вблизи транспортной развязки в центре города; II – парк вблизи центра города на левом берегу р. Ангары; III – парк в центре города на правом берегу р. Ангары; IV – парк в северо-западной части города; V – парковая зона в юго-западной части вблизи автодороги; VI – лесопарк в юго-восточной части города; VII – насаждения в южной части города вблизи дороги; VIII – зона отдыха вблизи набережной в юго-восточной части города; IX – центральный городской парк на острове Юность. На каждом участке отбирали пробы хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) для последующего их анализа на содержание ПАУ по методу, разработанному А.Г. Горшковым [7]. Фоновый (контрольный) ключевой участок располагался на расстоянии более 200 км от города, где содержание ПАУ в ассимиляционных органах деревьев соответствует естественному. Отбор проб хвои на каждом ключевом участке проводили в конце вегетационного сезона с 5–6 деревьев 40–45-летнего возраста, срезая ветви в верхней и средней частях кроны. В лабораторных условиях хвою отделяли от побегов, каждую пробу тщательно перемешивали, в целом масса пробы свежей хвои (сырой вес) составляла примерно 2 кг. Анализировали хвою сосны 2-го года жизни (как наиболее физиологически активную) и хвою развитых брахибластов лиственницы. Каждая проба хвои анализировалась в трёх повторностях. Для всех аналитических повторностей брали две навески хвои по 10 г каждая. В первой оценивали влажность хвои, высушивая её до постоянного веса при температуре +60 °С в течение 12–14 ч, из второй экстрагировали ПАУ. При экстракции ПАУ к образцу хвои добавляли 100 мл *n*-гексана и 0,05 мл раствора внутреннего стандар-

та (смесь аценафтена- d_{10} , фенантрена- d_{10} , хризена- d_{12} и перилена- d_{12} в *i*-пропиловом спирте с концентрацией 5 мкг/мл каждого). Экстракцию проводили в течение 0,5 ч при комнатной температуре в ультразвуковой ванне дважды. Объединенный экстракт концентрировали, фракцию ПАУ выделяли методом твердофазной экстракции на картридже силикагелем с последующей реэкстракцией сконцентрированного элюата из *n*-гексана в метанол. Определение ПАУ (суммы и индивидуальных соединений) проводили на хроматомасс-спектрометре Agilent, GC System 6890, MSD 5973 при следующих условиях: колонка DB-5MS, 30 м x 250 мкм; температурный режим колонки: 95 °С в течение 0,5 мин., далее градиент до 310 °С, 10 °С/мин. и 8 мин. при 310 °С; температура инжектора 290 °С; объём вводимого образца 2 мкл в режиме splitless. ПАУ детектировали по характеристичным ионам с m/z : 152 (аценафтилен), 154 (аценафтен), 164 (аценафтен- d_{10}), 166 (флуорен), 178 (фенантрен и антрацен), 188 (фенантрен- d_{10} и антрацен- d_{10}), 202 (флуорантен и пирен), 228 (бенз[а]антрацен и хризен), 240 (хризен- d_{12}), 252 (бенз[б]флуорантен, бенз[к]флуорантен бенз[е]пирен, бенз[а]пирен и перилен), 264 (перилен- d_{12}), 276 (индено[1,2,3-с,d]пирен и бенз[g,h,i]перилен) и 278 (добенз[а,h]пирен). Хроматограф калибровали по двум параллельным сериям калибровочных растворов с концентраций ПАУ от 20 до 2000 нг·мл⁻¹. Калибровочные графики: $m_{\text{ПАУ}}/m_{\text{ст}} = k(S_{\text{ПАУ}}/S_{\text{ст}})$ имели коэффициенты корреляции не менее 0,985–0,998, где: $m_{\text{ПАУ}}$, $m_{\text{ст}}$ – массы ПАУ и стандарта, соответственно, в анализируемом экстракте, нг; $S_{\text{ПАУ}}$, $S_{\text{ст}}$ – площадь пика определяемого ПАУ и стандарта, соответственно, отн. ед.; k – калибровочный коэффициент. Концентрацию ПАУ в хвое (с учётом влажности) рассчитывали в нг/г как среднее значение по результатам определений в параллельных пробах. Погрешность определения индивидуальных ПАУ оценена в диапазоне δ от 8 до 12%, суммы ПАУ – 7,4%.

Результаты исследования и их обсуждение

Обнаружено, что на фоновом ключевом участке суммарный уровень ПАУ в хвое сосны составляет в среднем 57 нг/г, в хвое лиственницы – 290 нг/г. Значительные различия по естественному (фоновому) содержанию ПАУ в хвое обусловлены, по-видимому, физиолого-биохимическими

особенностями этих двух видов древесных растений, вследствие чего хвоя лиственницы характеризуется изначально высоким содержанием в ней фенантрена, флуорантена, пирена и хризена, их общее количество (265 нг/г) почти в 6 раз превышает таковое (46 нг/г) в хвое сосны.

На ключевых участках городской территории полученные данные показывают значительный диапазон в содержании ПАУ (суммарного количества и индивидуальных соединений) в хвое сосны и лиственницы (табл. 1). Судя по этим данным, имеет место выраженное загрязнение городской территории ПАУ. Так, превышение фонового уровня этих поллютантов на ключевых участках в хвое сосны составляет от 1,5 до 18 раз, в хвое лиственницы – от 5 до 17 раз. При этом максимальные концентрации ПАУ в хвое и сосны, и лиственницы регистрируются на ключевом участке I (вблизи крупной транспортной развязки). Помимо этого, на территории г. Иркутска высокий уровень поллютантов (Σ ПАУ) в хвое сосны обнаруживается в его центральной части (ключевой участок III), а также вблизи крупной автодороги в юго-западной части (ключевой участок V), превышение фона здесь составляет 11–12 раз. Накопление ПАУ в хвое в 2,5–5,1 раза выше фонового отмечается на четырёх ключевых участках, расположенных в разных районах города, в том числе в некотором отдалении от автомагистралей. Довольно низкий уровень ПАУ выявлен в юго-восточной части городской территории (ключевые участки VI и VIII), из них самый низкий – вблизи набережной р. Ангары в микрорайоне Солнечный. В хвое лиственницы высокое накопление ПАУ, помимо ключевого участка I, обнаружено также на участке II (в 10,3 раза больше фонового), расположенном вблизи центра города на левом берегу р. Ангары. Несколько меньший уровень поллютантов регистрируется на ключевых участках III и IV (центральный парк на правом берегу Ангары, парк на северо-западе города), на остальных ключевых участках суммарное количество ПАУ в хвое превышает фоновое в 5,1–5,7 раза, из них минимальное содержание выявляется на ключевом участке IX (парковая зона на о. Юность). Таким образом, не всегда проявляется соответствие данных по накоплению ПАУ хвоей сосны и лиственницы, но однозначно можно говорить о наличии очень высокого загрязнения выбросами автотранспорта

ключевого участка I и о загрязнении в той или иной степени всей остальной городской территории этими поллютантами.

При определении индивидуальных ПАУ в хвое сосны идентифицировано 14 соединений (табл. 1). Показано, что в большинстве случаев, а именно на семи ключевых участках, преобладают и по процентной доле, и по соотношению газобразные летучие соединения, имеющие в структуре 3–4 ароматических кольца: фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз[a]антрацен и хризен (табл. 2). Доля (в процентах) соединений с 5–6 кольцами – бенз[b]флуорантена, бенз[k]флуорантена, бенз[e]пирена, бенз[a]пирена, перилена, индено[1,2,3-c,d]пирена, бензо[g,h,i]перилена, дибенз[a,h]антрацена – значительно ниже, поскольку они, как правило, адсорбированы на твёрдых носителях (пыль, сажа) и характеризуются более низкой летучестью, но в то же время особенно высокой токсичностью для биоты [4]. Вместе с тем не следует считать, что ПАУ с 3–4 ароматическими кольцами менее опасны – при высоком содержании и хроническом воздействии их токсичность для живых организмов может существенно возрастать [5]. Превалирование в хвое ПАУ с 3–4 кольцами в структуре характерно и для фонового ключевого участка, то есть для незагрязнённой хвои сосны из мест естественного её произрастания. Но в условиях техногенного загрязнения показатели качественного состава ПАУ изменяются (табл. 2). Так, на ключевом участке V, расположенном вблизи автодороги с довольно интенсивным движением, в хвое сосны обнаруживается примерно одинаковая процентная доля и легколетучих, и менее летучих соединений. Ключевой участок VII, где суммарное количество поллютантов намного меньше, чем на участке V, выделяется повышенной долей накопления в хвое ПАУ с 5–6 ароматическими кольцами. Участки III и IX характеризуются значительным превалированием содержания в хвое летучих ПАУ и минимальной долей наиболее токсичных. Что касается лиственницы, то динамика структурно разных ПАУ в ее хвое на обследованных ключевых участках сходна – и на фоновом ключевом участке, и на всех городских участках регистрируется явное преобладание ПАУ, имеющих в структуре 3–4 ароматических кольца, доля ПАУ с 5–6 кольцами в структуре варьирует от 10 до 26%, а по соотношению – меньше от 3 до 9 раз.

Таблица 1

Содержание суммы ПАУ и индивидуальных соединений (нг/г сух. веса, $\delta = 10\%$) в хвое сосны обыкновенной (в числителе) и лиственницы сибирской (в знаменателе) на территории г. Иркутска

ПАУ	Номер ключевого участка								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII*	IX
Сумма (Σ ПАУ)	$\frac{1005}{4875}$	$\frac{245}{3011}$	$\frac{700}{2156}$	$\frac{213}{2046}$	$\frac{610}{1665}$	$\frac{99}{1586}$	$\frac{143}{1495}$	82	$\frac{290}{1475}$
ФЕН	$\frac{170}{990}$	$\frac{61}{778}$	$\frac{77}{285}$	$\frac{63}{252}$	$\frac{220}{252}$	$\frac{29}{189}$	$\frac{15}{318}$	35	$\frac{68}{495}$
АНТ	$\frac{9,1}{110}$	$\frac{0,8}{63}$	$\frac{3,0}{9,0}$	$\frac{1,1}{7,0}$	$\frac{9,4}{10,0}$	$\frac{<0,2}{4,0}$	$\frac{<0,2}{3,0}$	2,0	$\frac{0,8}{36}$
ФЛУ	$\frac{243}{1088}$	$\frac{40}{661}$	$\frac{107}{387}$	$\frac{29}{321}$	$\frac{23}{380}$	$\frac{12}{244}$	$\frac{24}{70}$	8,6	$\frac{53}{71}$
ПИР	$\frac{360}{1400}$	$\frac{78}{644}$	$\frac{470}{388}$	$\frac{58}{317}$	$\frac{1,4}{371}$	$\frac{18}{266}$	$\frac{10}{83}$	6,1	$\frac{110}{36}$
БаА	$\frac{30}{220}$	$\frac{7,9}{131}$	$\frac{2,6}{169}$	$\frac{5,9}{146}$	$\frac{6,4}{76}$	$\frac{5,9}{80}$	$\frac{1,7}{80}$	2,1	$\frac{7,3}{128}$
ХР	$\frac{94}{588}$	$\frac{22}{415}$	$\frac{20}{535}$	$\frac{30}{530}$	$\frac{32}{371}$	$\frac{3,4}{463}$	$\frac{9,3}{550}$	9,2	$\frac{27}{360}$
БьФ	$\frac{29}{168}$	$\frac{11}{119}$	$\frac{8,1}{134}$	$\frac{11}{193}$	$\frac{95}{90}$	$\frac{8,1}{134}$	$\frac{20}{157}$	6,0	$\frac{9,1}{122}$
БкФ	$\frac{35}{157}$	$\frac{12}{122}$	$\frac{6,3}{145}$	$\frac{9,0}{172}$	$\frac{143}{13}$	$\frac{7,4}{122}$	$\frac{21}{148}$	4,5	$\frac{7,6}{130}$
БеП	$\frac{16}{76}$	$\frac{5,7}{48}$	$\frac{4,2}{54}$	$\frac{4,7}{66}$	$\frac{44}{60}$	$\frac{4,6}{49}$	$\frac{14}{42}$	3,0	$\frac{4,0}{50}$
БаП	$\frac{6,5}{31}$	$\frac{2,1}{12}$	$\frac{2,1}{28}$	$\frac{1,6}{22}$	$\frac{20}{22}$	$\frac{7,6}{13}$	$\frac{23}{20}$	5,5	$\frac{1,3}{19}$
ПЕР	$\frac{1,4}{4,0}$	$\frac{<0,2}{<0,2}$	$\frac{<0,2}{3,0}$	$\frac{<0,2}{<0,2}$	$\frac{2,6}{<0,2}$	$\frac{3,6}{3,0}$	$\frac{<0,2}{6,0}$	<0,2	$\frac{0,3}{6,0}$
ИНП	$\frac{5,5}{21}$	$\frac{2,0}{10}$	$\frac{<0,2}{11}$	$\frac{<0,2}{12}$	$\frac{7,2}{9,0}$	$\frac{<0,2}{11}$	$\frac{2,7}{13}$	<0,2	$\frac{1,0}{11}$
БП	$\frac{5,5}{22}$	$\frac{2,5}{9,0}$	$\frac{<0,2}{9,0}$	$\frac{<0,2}{9,0}$	$\frac{6,1}{11}$	$\frac{<0,2}{9,0}$	$\frac{4,0}{8,0}$	<0,2	$\frac{0,8}{11}$
ДБА	$\frac{<0,2}{<0,2}$	$\frac{<0,2}{<0,2}$	$\frac{<0,2}{<0,2}$	$\frac{<0,2}{<0,2}$	$\frac{<0,2}{<0,2}$	$\frac{<0,2}{<0,2}$	$\frac{<0,2}{<0,2}$	<0,2	$\frac{<0,2}{<0,2}$

Обозначения: ФЕН – фенантрен, АНТ – антрацен, ФЛУ – флуорантен, ПИР – пирен, БаА – бенз[а]антрацен, ХР – хризен, БьФ – бенз[б]флуорантен, БкФ – бенз[к]флуорантен, БеП – бенз[е]пирен, БаП – бенз[а]пирен, ПЕР – перилен, ИНП – индено[1,2,3-с,д]пирен, БП – бензо[г,х,и]перилен, ДБА – дибенз[а,х]антрацен.

Примечание: * – для ключевого участка VIII приводятся данные только для хвои сосны, поскольку деревья лиственницы здесь отсутствуют.

Таблица 2

Процентная доля и соотношение структурно разных ПАУ в хвое сосны (в числителе) и лиственницы (в знаменателе) на ключевых участках

ПАУ, имеющие в структуре	Номер ключевого участка									Фон
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII*	IX	
3–4 ароматических кольца, %	$\frac{90}{90}$	$\frac{86}{89}$	$\frac{97}{82}$	$\frac{87}{77}$	$\frac{49}{88}$	$\frac{69}{79}$	$\frac{42}{74}$	75	$\frac{91}{76}$	$\frac{84}{90}$
5–6 ароматических колец, %	$\frac{10}{10}$	$\frac{14}{11}$	$\frac{3}{18}$	$\frac{13}{23}$	$\frac{51}{12}$	$\frac{31}{21}$	$\frac{58}{26}$	25	$\frac{9}{24}$	$\frac{16}{10}$
Соотношение ПАУ ₍₃₋₄₎ :ПАУ ₍₅₋₆₎	$\frac{9:1}{9:1}$	$\frac{6:1}{8:1}$	$\frac{32:1}{5:1}$	$\frac{6:1}{3:1}$	$\frac{1:1}{7:1}$	$\frac{2:1}{4:1}$	$\frac{0,7:1}{3:1}$	3:1	$\frac{10:1}{3:1}$	$\frac{5:1}{9:1}$

Примечание: * – данные для хвои сосны.

Заключение

В соответствии с полученными данными по концентрациям индивидуальных ПАУ в хвое деревьев можно констатировать, что загрязнение городской территории большей частью вызвано летучими соединениями, имеющими в структуре 3–4 ароматических кольца. Рассчитанные процентные доли и соотношения ПАУ(3–4)/ПАУ(5–6) иллюстрируют специфику загрязнения городской среды, указывая участки с наибольшей долей высокоагрессивных соединений (ПАУ с 5–6 кольцами в структуре) в хвое сосны и лиственницы, хотя суммарное накопление поллютантов (Σ ПАУ) здесь может быть меньше, чем на других ключевых участках. Неравнозначное количественное и качественное загрязнение участков городской территории ПАУ может быть следствием влияния целого ряда факторов, включая локальную интенсивность техногенной (автотранспортной) нагрузки, скорость переноса и рассеивания загрязнённых потоков воздуха, частоту осадков, степень инсоляции, плотность застройки, состояние насаждений. Что касается выбора хвои сосны или лиственницы в качестве тест-объекта для оценки загрязнения городской среды ПАУ, то полученные данные не дают однозначного ответа, какой тест-объект «лучше». Оба достаточно адекватно выявили, что практически вся территория города загрязнена этими поллютантами, причем в большинстве случаев преобладают газообразные легколетучие ПАУ. Определённые несовпадения результатов по накоплению в хвое структурно разных ПАУ могут быть вызваны, помимо видовой анатомо-биохимической специфики ассимиляционных органов сосны и лиственницы, ещё и разной удаленностью их мест произрастания от автомагистралей даже в пределах одного ключевого участка. Кроме того, в практическом плане полученные результаты необходимы

для разработки подхода к определению регулирующих экосистемных услуг/функций, выполняемых городскими насаждениями. В частности, для расчета оптимальной площади зеленых массивов, способных поглощать техногенные поллютанты и очищать атмосферный воздух города.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-44-380016.

Список литературы / References

1. Голохваст К.С., Чернышев В.В., Угай С.М. Выбросы автотранспорта и экология человека (обзор литературы) // Экология человека. 2016. № 1. С. 9–14.
2. Golokhvast K.S., Chernyshev V.V., Ugay S.M. Car Exhausts and Human Ecology (Literature review) // *Ekologiya cheloveka*. 2016. № 1. P. 9–14 (in Russian).
3. Yan D., Wu S., Zhou S., Tong G., Li F., Wang Yu., Li B. Characteristics, sources and health risk assessment of airborne particulate PAHs in Chinese cities: A review. *Environmental Pollution*. 2019. V. 248. 804–814. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.02.068.
4. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2018 году». Иркутск: ООО Мегапринт, 2019. 307 с.
5. State report «On the state and environmental protection of the Irkutsk region in 2018». Irkutsk: ООО Megaprint, 2019. 307 p. (in Russian).
6. Abdel-Shafy H.I., Mansour M.S.M. Review on polycyclic aromatic hydrocarbons: source, environmental impact, effect on human health and remediation. 2016. *Egyptian Journal of Petroleum*. V. 25. 107–123. DOI: 10.1016/j.ejpe.2015.03.011.
7. Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А. Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 224 с.
8. Rovinskiy F.Ya., Teplitskaya T.A., Alekseeva T.A. Background monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988. 224 p. (in Russian).
9. AL-Alam J., Chbani A., Faljoun Z., Millet M. The use of vegetation, bees, and snails as important tools for the biomonitoring of atmospheric pollution – a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. V. 26. P. 9391–9408. DOI: 10.1007/s11356-019-04388-8.
10. Горшков А.Г. Определение полициклических ароматических углеводородов в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) – биомонитор загрязнения атмосферы // Журнал аналитической химии. 2008. Т. 63. № 8. С. 880–886.
11. Gorshkov A.G. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in the needles of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), a biomonitor of atmospheric pollution. *Journal Analytical Chemistry*. 2008. V. 63. No. 8. P. 805–811.