

УДК 631.423.4

ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИЕ АРОМАТИЧЕСКИЕ УГЛЕВОДОРОДЫ В ПОЧВАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ И СЕЛИТЕБНЫХ ЗОН ТЮМЕНИ

Константинова Елизавета Юрьевна¹,
konstantliza@gmail.com

Сушкова Светлана Николаевна²,
terra_rossa@mail.ru

Минкина Татьяна Михайловна²,
tminkina@mail.ru

Антоненко Елена Михайловна²,
antonenko1102@yandex.ru

Константинов Александр Олегович³,
konstantinov.alexandr72@gmail.com

Хорошавин Виталий Юрьевич¹,
purriver@mail.ru

¹ Тюменский государственный университет,
Россия, 625008, г. Тюмень, ул. Червишевский тракт, 13.

² Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета,
Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, просп. Стачки, 194/1.

³ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 56.

Актуальность работы обусловлена необходимостью исследования особенностей накопления полициклических ароматических углеводородов из числа приоритетных загрязнителей в почвенном покрове городских районов различного функционального назначения и промышленной специализации.

Цель работы: качественная и количественная оценка уровня загрязнения почвенного покрова селитебной и промышленных зон города по результатам изучения состава и содержания полициклических ароматических углеводородов.

Объекты: верхние ненарушенные горизонты (0–10 см) городских почв.

Методы: отбор почвенных проб, методы определения физико-химических свойств почв, экстракция полициклических ароматических углеводородов методом омыления, высокоэффективная жидкостная хроматография с флуориметрическим детектированием на приборе 1260 Infinity фирмы Agilent (США), статистические методы, расчет диагностических соотношений полициклических ароматических углеводородов, гигиенических и геохимических показателей.

Результаты. В почвах Тюмени определено содержание 12 приоритетных полициклических ароматических углеводородов: нафталена, флуорена, фенантрена, антрацена, флуорантена, пирена, бенз(а)антрацена, бенз(б)флуорантена, бенз(к)флуорантена, бенз(а)пирена, дибенз(а, h)антрацена, бенз(ghi)перилена. Показана широкая вариабельность содержания данных соединений в почвах различных зон города. Установлено, что повышенные содержания бенз(а)антрацена, бенз(б)флуорантена, бенз(к)флуорантена, бенз(а)пирена, и бенз(ghi)перилена определяют загрязнение почв селитебной зоны, а флуорен, фенантрен, бенз(а)антрацен и бенз(к)флуорантен – почв промышленных зон. Выявлено, что суммарное содержание полициклических ароматических углеводородов в почвах селитебной зоны в среднем вдвое выше, чем в почвах промышленных зон. Это обусловлено как физико-химическими свойствами почв, так и длительностью и интенсивностью антропогенной нагрузки. Интегральная оценка загрязнения почв приоритетными ПАУ показала опасный уровень загрязнения почв в селитебной зоне, умеренно опасный – в зоне влияния Антипинского нефтеперерабатывающего завода и допустимый – в зоне влияния ТЭЦ-2.

Ключевые слова:

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), низкомолекулярные и высокомолекулярные ПАУ, городские почвы, загрязнение, источники, функциональные зоны.

Введение

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) представляют собой группу из нескольких сотен высокомолекулярных органических углеводородных соединений, образованных, по меньшей мере, двумя конденсированными бензольными кольцами [1]. Соединения с 2–3 бензольными кольцами относят к группе низкомолекуляр-

ных, а с 4–6 кольцами – к группе высокомолекулярных [2–5]. Многие ПАУ проявляют токсичные, мутагенные, канцерогенные свойства, способны накапливаться в компонентах окружающей среды, поэтому рассматриваются в качестве опасных загрязняющих веществ, подлежащих нормированию [6]. В США 16 соединений ПАУ относятся к приоритетным загрязнителям [7]. В России уста-

новлены предельно допустимые концентрации (ПДК) бенз (а) пирена, в частности, в почвах они составляют 20 мкг/кг [8].

Городские почвы, с одной стороны, являются главным депонирующим ПАУ компонентом ландшафта [5, 9, 10], с другой стороны, сами могут выступать вторичным источником загрязненной пыли [11]. Содержание и пространственное распределение ПАУ в почвах урбанизированных территорий обусловлено главным образом антропогенной деятельностью [2], связанной с эксплуатацией автотранспорта, функционированием химической, нефтеперерабатывающей и энергетической промышленности [6, 12, 13]. Техногенные ПАУ образуются путем сжигания жидкого топлива, древесины и угля, при лесных пожарах [14, 15], обнаруживаются в нефтепродуктах и креозоте [1, 16].

Интенсивная урбанизация приводит к увеличению плотности населения, числа промышленных предприятий, развитию улично-дорожной сети, что в свою очередь вызывает изменение состава и количества ПАУ, поступающих в почвы [2, 17]. Показано, что повышенные концентрации ПАУ отмечаются в почвах как в пределах промышленных районов [4, 12, 18], так и в районах с высокой плотностью населения и интенсивными транспортными потоками [19, 20]. Увеличение доли высокомолекулярных ПАУ относительно низкомолекулярных связано с длительностью воздействия стационарных источников загрязнения ПАУ и увеличением площади городской застройки [4–5].

Город Тюмень – крупный активно развивающийся административный центр юга Западной Сибири. За последние 15 лет площадь территории увеличилась в 3 раза и составила 698 км², численность населения выросла в 1,5 раза до 744,6 тыс. чел. [21]. Техногенная нагрузка на городскую среду в основном связана с промышленностью и транспортом. В городе расположены предприятия по производству нефтепродуктов, электроэнергии, газа и воды, машин и оборудования, готовых металлических изделий и металлургического производства, электрооборудования, бетона и железобетона, обработке древесины, пищевых продуктов и пр. Крупные предприятия объединяются в промышленные узлы, размещенные на территории города неравномерно. Через Тюмень проходит Транссибирская магистраль, в черте города три крупных станции, вагоно-ремонтное и локомотивное депо. В городе эксплуатируется 305 тыс. транспортных средств, общая протяженность улично-дорожной сети составляет 1200,4 км [21]. В 1998 г. городским комитетом по экологии изучалось загрязнение почв Тюмени бенз (а) пиреном [22]. Несмотря на высокую техногенную нагрузку, определение содержания и состава приоритетных ПАУ в почвах города не проводилось.

Целью данной работы является качественная и количественная оценка уровня загрязнения почвенного покрова селитебной и промышленных зон города по данным изучения состава и содержания ПАУ.

Объекты и методы исследования

Природно-географическая характеристика территории исследования. Климат Тюмени континентальный со среднегодовым количеством осадков в 485 мм, продолжительность периода со снежным покровом 158 дней, ветер преимущественно юго-западного направления [23]. В природном отношении территория относится к Тюменскому району Туринской подпровинции Тавдинской провинции подзоны мелколиственных лесов [24]. Естественные ландшафты представлены осиново-березовыми и березовыми травяными лесами на междуречье и сосновыми лесами на борových террасах. Районы исследования (рис. 1) занимают поверхности IV и частично II–III надпойменных террас на высоком правом берегу р. Туры, сложенных озерно-аллювиальными суглинками и аллювиальными супесями и песками, соответственно. Правобережная часть города расположена в Тура-Пышминском районе выщелоченных черноземов, серых лесных почв и борových песков [25]. Естественный почвенно-растительный покров на территории города значительно преобразован [26]. Вследствие прямого антропогенного воздействия наибольшее распространение имеют антропогенно-измененные почвы – урбаноземы, а также искусственно созданные техногенные поверхностные образования, представленные культуроземами и реплантоземами [27].

Объектами исследования служили смешанные образцы верхних ненарушенных горизонтов (0–10 см) антропогенно-измененных и искусственно-созданных почв Тюмени. С целью оценки влияния процессов урбанизации, а именно длительности и интенсивности воздействия конкретных источников на уровень загрязнения городских почв исследованы три района Тюмени различного функционального назначения (рис. 1): селитебная зона, зона влияния ТЭЦ-2 и зона влияния Антипинского нефтеперерабатывающего завода (АНПЗ). Селитебная зона в центральной части города отличается продолжительным антропогенным воздействием и разнообразными источниками загрязнения, основным из которых является автотранспорт. На юго-востоке города расположена ТЭЦ-2 – наиболее мощный источник энерго- и теплоснабжения с 1986 г. В качестве основного вида топлива используется природный газ, резервного – газотурбинное топливо. АНПЗ – крупнейшее предприятие города, производящее дизельное топливо, бензин, кокс нефтяной, сжиженные углеводородные газы, техническую серу. Завод находится в восточной части города, введен в эксплуатацию в ноябре 2006.

Методы исследования. Полевые работы проводились летом 2016 г. Пробы отбирались методом конверта: в селитебной зоне и зоне влияния ТЭЦ-2 по 8 проб, в зоне влияния АНПЗ – 9 проб. Фоновое содержание ПАУ определялось в гумусовом горизонте серой лесной почвы под залежью в зоне сельскохозяйственного назначения в 10 км к северо-западу от города. Отбор почв с 0–10 см гумусового

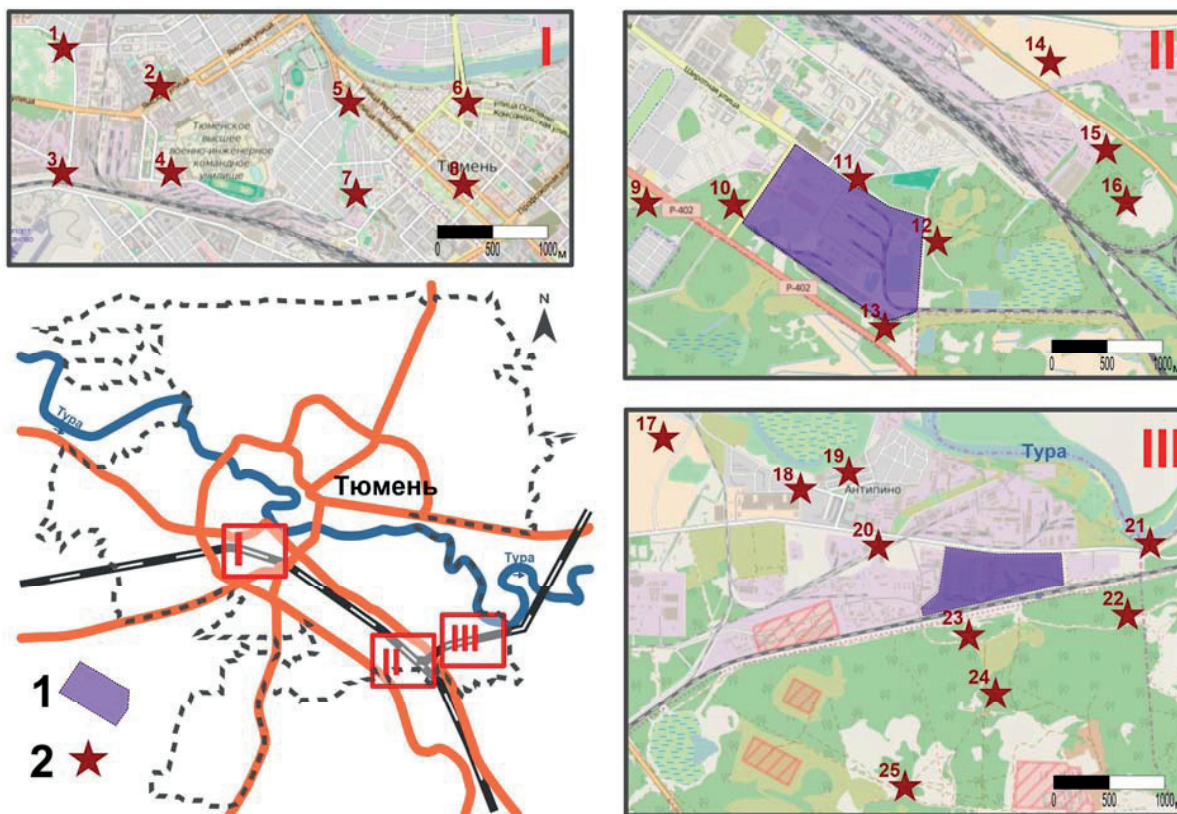


Рис. 1. Карта-схема площадок отбора проб на территории Тюмени: I – селитебная зона, II – зона влияния ТЭЦ-2, III – зона влияния Антипинского НПЗ. Обозначения: 1 – территория предприятия, 2 – площадки отбора проб

Fig. 1. Schematic map of sampling sites within the territory of Tyumen: I – residential area, II – CHP-2 plant impact area, III – Antipinsky Refinery impact area. Denoted by numbers: 1 – industrial sites, 2 – sampling sites

горизонта [28] обусловлен повышенным накоплением ПАУ в поверхностном слое почв за счет сорбции органическим веществом и незначительной миграцией вниз по почвенному профилю, что обеспечивает репрезентативность пробы.

Первичная подготовка проб включала отбор корней и растительных остатков из свежих образцов, высушивание при комнатной температуре, удаление включений, квартование, просеивание через сито с диаметром отверстий 1,0 и 0,25 мм [29]. В почвах определяли актуальную кислотность (рН) потенциометрическим методом в суспензии почва: вода в соотношении 1:2,5 при постоянном помешивании [29], содержание органического углерода ($C_{орг}$) – титриметрическим методом (бихроматное окисление по методу И.В. Тюрина) [29], гранулометрический состав – пипеточным методом Н.А. Качинского с растиранием пробы с пиррофосфатом натрия [30].

В основу анализа ПАУ положена методика определения массовой доли бенз (а) пирена в пробах почв, грунтов, донных отложений и твердых отходов методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с использованием флуориметрического детектора [31] (аттестованная в соответствии с ГОСТ Р 8.563–96), а также [32]. ПАУ из почв извлекали согласно методическим указаниям

по определению загрязняющих веществ в пробах морских донных отложений и взвеси [33], в модификации, позволяющей удалить мешающие липидные макрокомпоненты почвы методом омыления [34, 35]. Для этого 1 г образца помещали в коническую колбу, добавляли 30 мл 2 % раствора КОН в этаноле и кипятили на водяной бане с обратным холодильником в течение 3 ч. В процессе кипячения происходит омыление липидной фракции почв, что повышает степень экстракции ПАУ и уменьшает количество коэкстрактивных веществ в экстрактах. Затем экстрагировали на механическом встряхивателе в течение 10 мин при добавлении 5 мл дистиллированной воды и 15 мл гексана. Извлечение повторяли 3 раза. Разделение слоев проводили в делительной воронке, промывая дистиллированной водой до нейтральной реакции по индикаторной бумаге. Далее экстракт пропускали через воронку с сульфатом натрия в чистую сухую роторную колбу, упаривали на ротационном испарителе при $t=+44^{\circ}\text{C}$ до сухого остатка, к которому добавляли 1 мл ацетонитрила. Состав и содержание ПАУ в экстрактах определяли методом ВЭЖХ с флуориметрическим детектированием (1260 Infinity «Agilent», США). Идентификация ПАУ проводилась по относительному времени удерживания индивидуального соединения ПАУ и сравнению со

стандартным образом. Содержание ПАУ в почве рассчитывали по формуле:

$$a = k S_i C_{\text{ст}} \cdot 1000 / (S_{\text{ст}} m) V,$$

где a – содержание ПАУ, нг/г; $S_{\text{ст}}$ и S_i – площади пиков ПАУ стандартного раствора и образца; $C_{\text{ст}}$ – концентрация стандартного раствора ПАУ, нг/мл; k – коэффициент извлечения ПАУ из образца; m – масса образца, г; V – объем ацетонитрильного экстракта.

Выявлены 12 соединений ПАУ: нафталин (Наф), флуорен (Флу), фенантрен (Фен), антрацен (Ант), флуорантен (Флт), пирен (Пир), бенз(а)антрацен (БаА), бенз(б)флуорантен (БбФ), бенз(к)флуорантен (БкФ), бенз(а)пирен (БаП), дибенз(а, h)антрацен (ДБА), бенз(ghi)перилен (BghiП). Погрешность измерения для доверительной вероятности $P=0,95$ составила 20 % (во всем диапазоне).

Статистический анализ данных выполнен в пакете Statistica 10, включал расчеты среднего значения, медианы, минимальных и максимальных значений, коэффициента вариации C_v . Влияние свойств почв на накопление ПАУ оценивали при помощи коэффициентов ранговой корреляции Спирмена.

Происхождение ПАУ в почвах устанавливали по соотношениям между индивидуальными ПАУ: Ант/(Ант+Фен), Флт/(Флт+Пир), БаП/BghiП. Соотношение Ант/(Ант+Фен) менее 0,1 определяет петрогенные источники, более 0,1 – пирогенные [14, 36]. Соотношение Флт/(Флт+Пир) менее 0,4 указывает на петрогенное происхождение, от 0,4 до 0,5 – на выбросы при сжигании нефтепродуктов, более 0,5 – на сжигание угля и древесины [19, 36]. Соотношение БаП/BghiП менее 0,6 является признаком петрогенного происхождения, от 0,6 до 0,9 – происхождения, связанного с передвижными источниками, более 0,9 – сжигания угля [37].

Оценка степени загрязнения почв ПАУ проводилась на основе расчета коэффициентов опасности, коэффициентов концентрации и суммарного показателя загрязнения [28]. Коэффициент опасности K_0 отражает превышение содержания БаП, который относится к соединениям первого класса опасности, над его ПДК. По данному показателю выделяются следующие категории загрязнения: слабая (1–2 ПДК), сильная (2–5 ПДК) и очень сильная (более 5 ПДК). Уровень загрязнения почв индивидуальными соединениями определяли по коэффициентам концентрации K_c , показывающим превышения содержаний ПАУ относительно фоновых значений. Интегральная оценка загрязнения проводилась при помощи суммарного показателя загрязнения Z_c , выраженного формулой:

$$Z_c = \Sigma(K_{ci} + \dots + K_{cn}) - (n-1),$$

где n – число определяемых суммируемых веществ; K_{ci} – коэффициент концентрации i -го компонента загрязнения. По Z_c выделяют следующие категории загрязнения почв: <16 – допустимая, 16–32 – умеренно опасная, 32–128 – опасная и >128 чрезвычайно опасная.

Результаты и их обсуждение

Физико-химические свойства почв зон различного функционального назначения. Рассматриваемые районы отличаются характером функционального зонирования, типами землепользования, преобладающими видами антропогенного воздействия, а также литолого-геоморфологическими условиями, что находит отражение в дифференциации почвенного покрова. В селитебной зоне широко распространены антропогенно-преобразованные почвы, представленные урбанизациями, и искусственно созданные почвы – технозомами и реплантозомами, сформированные на техногенных отложениях. Почвы характеризуются реакцией среды от нейтральной до щелочной (от 7,1 до 8,2, в среднем 7,7). Высокие значения pH обусловлены поступлением на поверхность атмосферной пыли и строительного мусора, обогащенных карбонатным материалом [11]. Почвы отличаются повышенным содержанием органического углерода (от 1,7 до 6,2 %, в среднем 3,4 %), что объясняется привнесением гумусового материала на поверхность городских почв [38]. По гранулометрическому составу почвы значительно отличаются (табл. 1), однако доминируют легкосуглинистые разности с повышенным содержанием фракции физической глины (до 38,4 %). С одной стороны, это связано с формированием данных почв на аллювиальных суглинистых отложениях IV надпойменной террасы, с другой стороны, свидетельствует о поступлении атмосферной пыли.

Промышленная площадка ТЭЦ-2 окружена защитной зоной городских смешанных и хвойных лесов. В лесах распространены слабо дифференцированные почвы борových песков, сформированные на субаэральном песчаных отложениях II–III террас. Почвы имеют легкий гранулометрический состав (табл. 1), содержание фракции физической глины в среднем 5,4 %. Реакция среды в поверхностном горизонте почв варьирует от кислой до нейтральной (от 4,8 до 6,9). Содержание органического углерода составляет от 0,9 до 5,9 %, в среднем 2,1 %.

Территория АНПЗ на севере граничит с производственно-складскими и селитебными зонами п. Антипино, на юге – с защитной зоной хвойных лесов. В северной части распространены преимущественно урбанизациями и рекреациями, в южной – дерново-подзолистыми почвами. Почвы зоны влияния АНПЗ сформированы на песчаных отложениях комплекса II–III надпойменных террас. По сравнению с почвами селитебной зоны в центральной части города (табл. 1), антропогенно-нарушенные почвы зоны АНПЗ характеризуются более низкими значениями pH (от 6,9 до 7,6, в среднем 7,1), близкими значениями содержания органического углерода (от 1,7 до 4,8 %, в среднем 4,4 %), более легким гранулометрическим составом (содержание физической глины до 21,6 %). Дерново-подзолистые почвы отличаются реакцией среды от кислой до нейтральной (pH от 5,3 до 6,6), низким содержанием органического углерода (в среднем

1,6 %), облегченным гранулометрическим составом с минимальным содержанием фракции физической глины (в среднем 5,0 %).

Таблица 1. Физико-химические свойства почв г. Тюмени

Table 1. Physicochemical characteristics of the soils of Tyumen

Район Area	Площадка Sampling site	pH	C _{орг} Organic carbon, %	Содержание фракций, % Content of fractions, %						Физическая глина Physical clay
				<0,001	0,001–0,005	0,005–0,01	0,01–0,05	0,05–0,25	0,25–1,0	
Селитебная зона Residential area	1	8,2	1,7	–	–	–	–	–	–	–
	2	7,9	6,2	0,0	4,8	4,8	17,5	60,3	12,6	9,6
	3	7,7	2,6	13,5	7,2	8,0	33,5	30,9	6,9	28,7
	4	7,9	2,8	15,2	7,2	6,4	15,2	47,4	8,6	28,8
	5	7,1	3,1	8,8	7,2	22,4	0,0	58,5	3,1	38,4
	6	7,3	2,1	11,2	8,0	4,0	15,9	57,1	3,8	23,2
	7	7,8	5,1	3,2	4,0	0,0	14,3	75,9	2,6	7,2
	8	7,5	3,2	12,0	8,0	8,0	18,4	50,2	3,4	28,0
Зона влияния ТЭЦ-2 CHP-2 plant impact area	9	6,7	1,0	4,0	0,8	0,8	8,8	75,8	9,8	5,6
	10	5,8	2,5	0,0	1,6	2,4	4,0	80,0	12,0	4,0
	11	7,7	0,8	8,0	0,0	0,0	3,2	79,5	9,3	8,0
	12	5,3	2,2	2,4	1,6	0,8	0,8	78,1	16,3	4,8
	13	4,8	2,4	0,0	3,2	0,0	4,8	75,5	16,5	3,2
	14	6,9	0,9	6,4	1,6	2,4	11,1	75,7	2,8	10,4
	15	6,8	5,9	0,8	0,0	0,8	8,8	68,8	20,8	1,6
	16	5,3	1,1	3,2	1,6	0,8	1,6	81,5	11,3	5,6
Зона влияния АНПЗ Antipinsky Refinery impact area	17	6,9	4,8	6,4	8,8	6,4	24,0	51,8	2,6	21,6
	18	7,6	1,7	8,0	4,0	6,4	12,0	65,0	4,6	18,4
	19	7,0	7,9	4,8	0,0	0,0	10,4	74,3	10,5	4,8
	20	6,9	3,1	8,0	0,0	0,0	15,2	69,7	7,1	8,0
	21	6,6	0,9	3,2	0,0	0,0	7,2	89,6	0,0	3,2
	22	5,9	1,6	0,8	1,6	0,0	5,6	79,2	12,8	2,4
	23	6,3	2,2	2,4	3,2	0,0	31,2	54,4	8,8	5,6
	24	5,5	2,1	4,0	4,0	0,0	0,8	80,1	11,1	8,0
	25	5,3	1,2	0,8	3,2	1,6	2,4	84,8	7,2	5,6

Примечание. Знак «–» обозначает, что данный показатель не определялся.

Note. Symbol «–» denotes undetermined index.

Состав и содержание ПАУ в фоновых и городских почвах. В почвах выявлены 4 низкомолекулярных и 8 высокомолекулярных соединений ПАУ. Состав и содержание индивидуальных ПАУ в почвах селитебной и промышленных зон, а также фоновой почвы представлены в табл. 2.

Суммарное содержание ПАУ в фоновой почве составляет 113,5 мкг/кг. Данное значение вдвое ниже, чем средние значения Σ_{12} ПАУ в поверхностных горизонтах сельскохозяйственных почв (266,2 мкг/кг) и естественных незалесенных почв (239 мкг/кг) умеренного пояса [17]. Аналогичный уровень содержания ПАУ зафиксирован в дерново-подзолистых почвах Мещеры (84,1 мкг/кг по сумме Наф, Фен, Пир, БаА, БкФ, БаП и BghiП) [39]. Также близкие значения по Σ_{12} ПАУ отмечены в агропочвах ряда регионов Польши [11, 40]: Подляском

(85,9 мкг/кг) и Люблинском (122,7 мкг/кг) воеводствах, Верхней Силезии (170 мкг/кг), и в пригородных почвах Санъяна (Китай; 163,3 мкг/кг) [41].

В групповом составе исследуемых фоновых почв преобладают высокомолекулярные ПАУ, на долю которых приходится 58,5 % от суммы ПАУ. Наибольший вклад в состав индивидуальных соединений вносят Фен (30,2 %), Пир (22,1 %) и Флт (15,0 %). Остальные соединения присутствуют в небольшом количестве – от 1,3 (БаП) до 8,8 мкг/кг (Ант). Дибенз (а, h) антрацен в фоновой почве не обнаружен.

Суммарное содержание ПАУ в городских почвах значительно варьирует ($C_r=83,5$ %): от 33,4 мкг/кг в почвах борových песков до 1111,3 мкг/кг в урбаноземах (табл. 2). В среднем Σ_{12} ПАУ составляет 341 мкг/кг и превышает фоновое значение в 3 раза. В групповом составе преобладают высокомолекулярные ПАУ, доля которых уменьшается от 71,2 % (в среднем 925,9 мкг/кг) в антропогенно-измененных почвах до 56,5 % (в среднем 622,8 мкг/кг) в слабонарушенных почвах. Суммарные содержания высокомолекулярных ПАУ составляют 20,6–860,5 мкг/кг, низкомолекулярных ПАУ – 12,8–329,5 мкг/кг. Как и в природных аналогах, в составе индивидуальных ПАУ городских почв доминируют Фен, Пир и Флт (суммарно 60,5 %). Вместе с тем увеличивается доля BghiП (10,8 %), единственного высокомолекулярного ПАУ с шестью ароматическими кольцами, наиболее токсичного, накопление которого связано с техногенным воздействием [17].

Близкие уровни содержания ПАУ в почвах наблюдаются в ряде средних и крупных активно развивающихся городов. Так, например, среднее содержание 12 ПАУ в почвах Любляны (Словения) составляет 825,8 мкг/кг (предел колебаний 150,6–4959,6 мкг/кг) [3], Диловасы (Турция) – 895 мкг/кг (43,3–6109 мкг/кг) [18], Синьчжуана (Китай) – 576 мкг/кг (88,6–2064,7 мкг/кг) [4], Чжаньцзяна – 562,9 мкг/кг [42].

По сравнению с крупнейшими городами России, такими как Москва (3737 мкг/кг) [39] и Санкт-Петербург (1805 мкг/кг) [20], суммарное содержание соответствующих ПАУ в почвах Тюмени на порядок меньше.

Свойства почв как факторы накопления ПАУ. Влияние физико-химических свойств городских почв Тюмени на уровни содержания ПАУ оценивалось по результатам корреляционного анализа (табл. 3). Установлены значимые связи в основном для высокомолекулярных ПАУ (кроме Пир) и их отсутствие для низкомолекулярных Наф, Фен, Ант. Показано [43], что уровень содержания низкомолекулярных ПАУ во многом определяется привносом их с атмосферными осадками. Кроме того, в поверхностном горизонте почв преобладают процессы разрушения низкомолекулярных ПАУ в ходе фотодеструкции и биологической дегградации и выноса за счет испарения и вымывания [4–5, 16, 17].

Таблица 2. Содержание ПАУ в почвах площадок отбора проб г. Тюмени, мкг/кг

Table 2. Content of PAHs ($\mu\text{g kg}^{-1}$) in the soils of sampling sites in Tyumen

Район Area	Площадка Sampling site	Низкомолекулярные соединения Low molecular weight					Высокомолекулярные соединения High molecular weight										Σ ₁₂ ПАУ Σ ₁₂ PAH
		2 кольца 2 rings		3 кольца 3 rings		Σ ₂₋₃ ПАУ Σ _{LMW} PAH	4 кольца 4 rings			5 колец 5 rings			6 колец 6 rings		Σ ₄₋₆ ПАУ Σ _{HMW} PAH		
		Наф NAP	Флу FL	Фен PHE	Ант ANT		Флт FLT	Пир PYR	БаА BaA	БбФ BbF	БкФ BkF	БаП BaP	ДБА DBA	БghiП BghiP			
Селитебная зона Residential area	1	0,7	5,3	45,3	10,1	61,4	25,3	34,0	13,5	19,7	8,6	14,0	18,8	52,7	186,6	248,0	
	2	1,6	12,0	147,0	33,7	194,3	133,1	129,1	55,4	115,7	39,5	57,7	32,8	145,0	708,3	902,6	
	3	3,2	4,4	39,6	8,6	55,8	40,2	37,9	22,1	33,2	12,9	26,1	8,7	40,5	221,6	277,4	
	4	1,8	14,0	175,4	59,6	250,8	143,8	155,7	71,0	111,9	46,4	85,1	37,3	209,3	860,5	1111,3	
	5	1,4	5,6	97,6	24,8	129,4	131,6	120,0	44,3	70,1	26,9	55,7	5,6	105,1	559,3	688,7	
	6	4,3	0,8	41,7	11,4	58,2	40,5	59,6	17,6	18,6	7,4	19,0	6,0	35,3	204,0	262,2	
	7	4,2	10,0	72,1	16,6	102,9	30,7	47,2	10,6	9,6	1,9	10,5	2,2	24,1	136,8	239,7	
	8	0,6	0,6	14,3	2,9	18,4	22,3	21,7	11,1	14,0	5,0	12,8	2,9	23,7	113,5	131,9	
Зона влияния ТЭЦ-2 CHP-2 plant impact area	9	1,4	8,2	69,1	16,6	95,3	25,0	43,9	8,3	11,2	3,2	10,6	2,9	14,6	119,7	215,0	
	10	2,8	13,7	142,8	34,8	194,1	96,8	148,0	18,3	11,2	7,7	10,8	3,2	21,1	317,1	511,2	
	11	1,9	0,7	8,7	1,5	12,8	4,2	5,8	1,6	2,2	0,8	1,6	0,7	3,7	20,6	33,4	
	12	3,1	14,6	263,0	48,8	329,5	155,7	276,0	14,8	13,7	8,0	14,4	1,2	28,6	512,4	841,9	
	13	1,9	1,7	14,9	2,9	21,4	5,7	8,4	2,1	3,6	0,7	1,5	2,3	5,5	29,8	51,2	
	14	0,7	0,8	34,0	8,3	43,8	25,9	43,3	8,9	6,2	2,4	8,3	1,3	20,0	116,3	160,1	
	15	9,1	13,5	85,4	17,0	125,0	43,2	67,3	9,7	13,4	3,2	10,7	8,7	21,4	177,6	302,6	
	16	2,1	3,5	34,4	5,2	45,2	10,7	16,1	2,1	2,4	0,8	2,1	0,6	4,9	39,7	84,9	
Зона влияния АНПЗ Antipinsky Refinery impact area	17	2,0	14,1	137,3	21,6	175,0	39,0	60,4	10,9	16,6	2,2	12,0	1,7	19,7	162,5	337,5	
	18	1,8	0,6	14,1	3,4	19,9	16,4	26,7	11,9	8,6	4,5	11,7	6,0	16,1	101,9	121,8	
	19	0,5	1,3	29,1	6,1	37,0	11,9	16,5	2,4	3,9	0,4	1,7	0,6	4,0	41,4	78,4	
	20	2,2	6,9	139,0	37,7	185,8	114,9	156,8	15,0	19,7	9,6	13,1	2,8	36,3	368,2	554,0	
	21	2,3	8,5	67,3	9,9	88,0	25,0	38,0	9,8	7,9	3,3	11,5	2,2	17,9	115,6	203,6	
	22	0,1	5,0	52,5	9,3	66,9	21,1	38,5	5,9	6,0	2,0	7,7	2,2	13,4	96,8	163,7	
	23	0,3	9,5	74,2	16,5	100,5	32,2	10,7	11,0	11,0	3,8	10,9	3,6	21,7	104,9	205,4	
	24	6,0	17,7	92,1	16,7	132,5	32,5	56,7	9,6	8,8	2,0	8,4	8,0	15,6	141,6	274,1	
	25	1,0	20,6	241,8	25,5	288,9	78,3	107,2	10,2	11,1	2,5	8,6	1,6	16,4	235,9	524,8	
Фон Natural area	–	1,7	2,3	34,3	8,8	47,1	17,0	25,1	2,8	6,0	1,3	6,0	0,0	8,2	66,4	113,5	

Note. NAP – naphthalene, FL – fluorene, PHE – phenanthrene, ANT – anthracene, FLT – fluoranthene, PYR – pyrene, BaA – benzo [a] anthracene, BbF – benzo [b] fluorantene, BkF – benzo [k] fluoranthene, BaP – benzo [a] pyrene, DBA – dibenzo [a, h] anthracene, BghiP – benzo [ghi] perylene.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции Спирмена между содержанием ПАУ и свойствами городских почв

Table 3. Spearman Rank Order Correlations between the PAH concentrations and the urban soils properties

ПАУ PAH	Флу FL	Флт FLT	БаА BaA	БбФ BbF	БкФ BkF	БаП BaP	ДБА DBA	БghiП BghiP	Σ_{4-6} ПАУ Σ_{HWMW} PAH	Σ_{12} ПАУ Σ_{12} PAH
pH			0,46	0,48	0,43	0,51	0,46	0,53		
$C_{\text{орг}}$ /Organic carbon		0,41	0,43	0,5				0,45		0,40
Фракции, мм Particle size fractions, mm	<0,001	–0,42				0,41				
	0,001–0,005		0,56	0,54		0,55	0,46	0,5		
	0,005–0,01		0,65	0,65	0,62	0,67	0,43	0,54	0,49	
	0,01–0,05			0,43		0,44		0,43		
	0,05–0,25		–0,57	–0,64	–0,51	–0,63	–0,55	–0,60		

Примечание. Синим цветом выделены значения, статистически значимые при $p < 0,01$, красным цветом – при $p < 0,05$.

Note. Values highlighted in blue are statistically significant at $p < 0,01$, highlighted in red – at $p < 0,05$.

Положительная корреляция ($r=0,43–0,53$) наблюдается между значениями pH и содержаниями БаА, БбФ, БкФ, БаП, ДБА, БghiП. Этим объясняется повышенное содержание высокомолекулярных ПАУ

в нейтральных и щелочных почвах (табл. 1). Подобная тенденция также отмечалась в работах [11].

Выявлена прямая средняя корреляция ($r=0,4–0,5$) между содержанием органического углерода и со-

держаниями Флт, БаА, БбФ, BghiП, Σ_{12} ПАУ. Высокмолекулярные ПАУ более устойчивы к деградации, обладают низкой растворимостью, в почвах они преимущественно сорбируются органическим веществом [5, 9–11, 17–18].

Известно, что содержание ПАУ, преимущественно высокомолекулярных, увеличивается с уменьшением размерности частиц [11, 15–17]. Анализ показал, что наблюдается средняя отрицательная корреляция (r от $-0,64$ до $-0,51$) между содержанием фракции мелкого песка ($0,05$ – $0,25$ мм) и содержанием БаА, БбФ, БкФ, БаП, ДБА, BghiП. Данные соединения ассоциированы с тонкими пылеватыми частицами, особенно с фракцией средней пыли ($0,005$ – $0,01$ мм; r от $0,43$ до $0,67$).

Состав и содержание ПАУ в почвах зон различного функционального назначения. Наблюдаются существенные различия в составе и содержаниях ПАУ в почвах селитебной и промышленных зон Тюмени (табл. 4). Суммарное содержание ПАУ в почвах уменьшается в ряду: селитебная зона > зона влияния ТЭЦ-2 > зона влияния АНПЗ. В среднем Σ_{12} ПАУ в почвах селитебной зоны ($482,7$ мкг/кг) почти в два раза выше, чем в почвах зон влияния ТЭЦ-2 и АНПЗ ($275,0$ и $273,3$ мкг/кг соответственно). Повышенное содержание ПАУ в почвах селитебной зоны, вероятно, обусловлено значительным поступлением загрязненных атмосферных аэрозолей и дорожной пыли.

В групповом составе доминируют высокомолекулярные соединения, причем в селитебной зоне их доля наиболее высокая, что отражает преимущественно антропогенный характер поступления

ПАУ [16, 19]. Σ_{4-6} ПАУ в почвах селитебной зоны составляет $373,8$ мкг/кг, зоны влияния ТЭЦ-2 – $166,7$ мкг/кг, зоны влияния АНПЗ – $152,1$ мкг/кг. Σ_{2-3} ПАУ в исследуемых зонах находится приблизительно на одном уровне ($108,4$ – $121,6$ мкг/кг).

Среди индивидуальных ПАУ в почвах зон влияния ТЭЦ-2 и АНПЗ наибольший вклад имеют Фен, Пир и Флт (суммарная доля $74,0$ и $70,3$ % соответственно), что типично для городских почв умеренного пояса [3, 43]. В то же время в почвах селитебной зоны преобладают BghiП, Фен, Пир, Флт, БбФ и БаП (табл. 4).

Почвы различных зон дифференцированы не только по составу, но и по содержанию отдельных ПАУ, которые отличаются высоким диапазоном варьирования (табл. 4). Содержание Наф и Ант в почвах зон различного функционального назначения сопоставимо по уровню ($1,8$ – $2,9$ и $16,3$ – $21,0$ мкг/кг, соответственно), что, вероятно, объясняется, с одной стороны, их педогенным происхождением [16], с другой стороны, поступлением в почвы с атмосферными осадками [43]. В почвах зоны влияния АНПЗ отмечаются максимальные содержания Флу ($9,4$ мкг/кг) и Фен ($94,2$ мкг/кг), что, возможно, связано с разливами сырья или нефтепродуктов [4, 16]. Влияние объектов энергетики и транспорта [16] проявляется в повышенном содержании Пир в почвах зоны влияния ТЭЦ-2 и селитебной зоны ($76,1$ и $75,7$ мкг/кг). В почвах селитебной зоны наблюдаются значительные превышения (до 5 раз) содержаний ряда соединений: Флт, БаА, БаП, ДБА, BghiП, БкФ, БбФ, что обусловлено их поступлением при сжигании угля и дров в процессе печ-

Таблица 4. Особенности распределения ПАУ в почвах различных зон г. Тюмени

Table 4. Peculiarities of PAH distribution in soils of different areas of Tyumen

ПАУ PAH	Селитебная зона Residential area				Зона влияния ТЭЦ-2 CHP-2 plant impact area				Зона влияния АНПЗ Antipinsky Refinery impact area			
	Среднее Mean	% от Σ % of Σ	C_v , %	K_c	Среднее Mean	% от Σ % of Σ	C_v , %	K_c	Среднее Mean	% от Σ % of Σ	C_v , %	K_c
Наф/NAP	2,2	0,5	66,6	1,3	2,9	1,0	91,3	1,7	1,8	0,7	99,3	1,1
Флу/FL	6,6	1,4	75,4	2,9	7,1	2,6	86,8	3,1	9,4	3,4	74,2	4,1
Фен/PHE	79,1	16,4	71,8	2,3	81,5	29,6	104,8	2,4	94,2	34,4	74,3	2,7
Ант/ANT	21,0	4,3	87,9	2,4	16,9	6,1	99,6	1,9	16,3	6,0	66,2	1,9
Σ ПАУ ₂₋₃ / Σ PAH _{LMW}	108,9	22,6	72,6	2,3	108,4	39,4	99,6	2,3	121,6	44,4	69,5	2,6
Флт/FLT	70,9	14,7	76,8	4,2	45,9	16,7	116,7	2,7	41,3	15,1	81,8	2,4
Пир/PYR	75,7	15,7	67,7	3,0	76,1	27,7	122,1	3,0	56,8	20,8	83,2	2,3
БаА/BaA	30,7	6,4	75,4	11,0	8,2	3,0	75,0	2,9	9,6	3,5	37,4	3,4
БбФ/BbF	49,1	10,2	90,0	8,2	8,0	2,9	61,6	1,3	10,4	3,8	48,0	1,7
БкФ/BkF	18,6	3,8	14,3	14,3	3,4	1,2	88,5	2,6	3,4	1,2	77,9	2,6
БаП/BaP	35,1	7,3	78,5	5,9	7,5	2,7	67,4	1,3	9,5	3,5	36,4	1,6
ДБА/DBA	14,3	3,0	97,0	–	2,6	0,9	101,3	–	3,2	1,2	74,2	–
BghiП/BghiP	79,5	16,5	85,3	9,7	15,0	5,4	62,2	1,8	17,9	6,5	47,6	2,2
Σ_{4-6} ПАУ/ Σ_{HWM} PAH	373,8	77,4	77,9	5,6	166,7	60,6	102,2	2,5	152,1	55,6	63,8	2,3
Σ_{12} ПАУ/ Σ_{12} PAH	482,7		76,0	4,2	275,0		100,9	2,4	273,7		61,8	2,4
Z_c				55,2				14,7				16,0

Примечание. Среднее содержание в мкг/кг. Красным выделены максимальные средние значения.

Note. Mean content is in $\mu\text{g kg}^{-1}$. Maximum mean values are highlighted in red. C_v – coefficient of variance, K_c – concentration coefficient, Z_c – total pollution index.

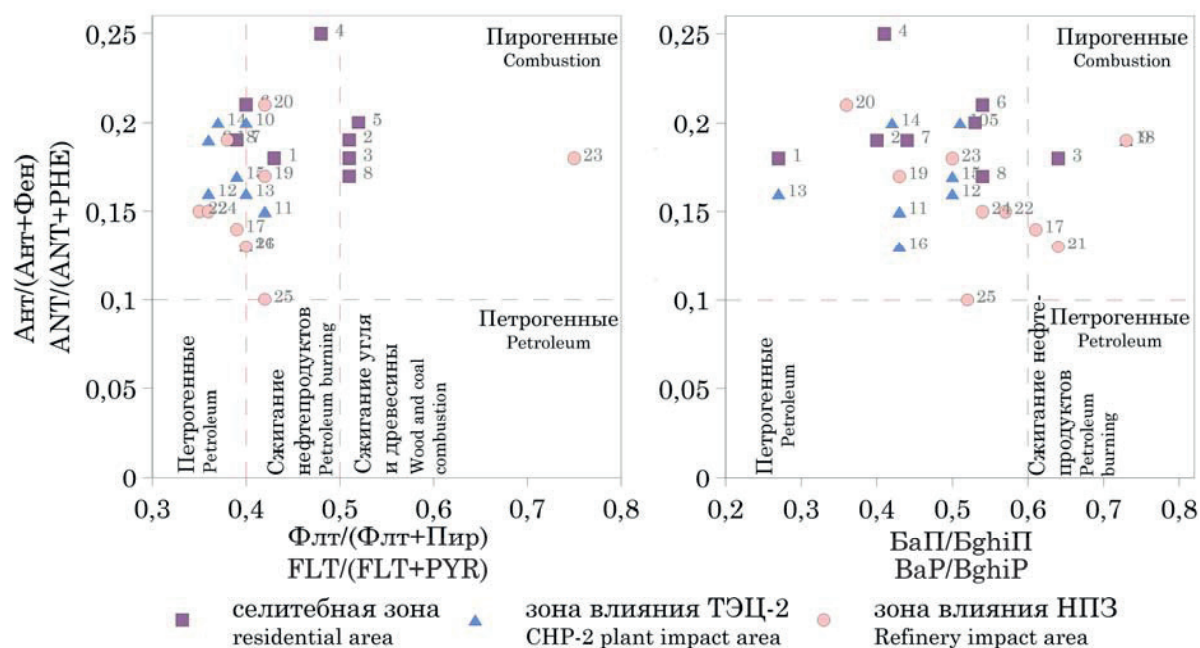


Рис. 2. Индикаторные соотношения ПАУ в почвах исследуемых районов

Fig. 2. PAHs diagnostic ratios in soils of research areas

ного отопления, с выхлопными газами, при сжигании бытового мусора и т. п. [3–4, 17, 39].

Индикация источников ПАУ. Расчет индикаторных соотношений по содержаниям индивидуальных ПАУ показал, что низкомолекулярные и высокомолекулярные ПАУ поступают в почвы из разных источников (рис. 2). Так, по соотношению $\text{Ant}/(\text{Ant}+\text{Fen})$ выявлено, что низкомолекулярные ПАУ имеют пирогенное происхождение во всех зонах города.

Наблюдается дифференциация источников поступления высокомолекулярных ПАУ в почвы селитебной и промышленных зон. Согласно расчету соотношения 4-кольчатых ПАУ $\text{Flt}/(\text{Flt}+\text{Pyr})$, в почвы селитебной зоны ПАУ в равной степени поступают вследствие сжигания угля, древесины и нефтепродуктов. Возможно, это связано с наличием районов индивидуальной застройки с печным отоплением и влиянием железнодорожного транспорта. В промышленных зонах в равном соотношении обнаруживаются ПАУ как петрогенного происхождения, так и поступающие вследствие сжигания нефтепродуктов. Результаты расчета соотношения более тяжелых 5–6-кольчатых BaP/BghiP указывают на значительное поступление ПАУ из

углеводородного сырья и нефтепродуктов, вероятно, связанных с разливами топлива и производственными выбросами.

Оценка степени загрязнения почв ПАУ. Сравнение содержания ПАУ в почвах различных функциональных зон с фоновым уровнем (табл. 4) показало максимальное превышение суммарного содержания ПАУ в почвах селитебной зоны ($K_c=4,2$). При этом, в почвах этой зоны наиболее интенсивно накапливаются (до 11 раз) высокомолекулярные ПАУ, такие как БкФ, БаА, BghiП, БбФ и БаП. Почвы в непосредственной близости от крупных улиц в селитебной зоне характеризуются сильной степенью загрязнения БаП, в них наблюдается превышение ПДК более чем в 2 раза (рис. 3).

Суммарное содержание ПАУ в почвах промышленных зон превышает фоновое содержание ПАУ ($K_c=2,4$), преимущественно за счет накопления Флу, Фен, Флт, Пир, БаА и БкФ. Расчеты коэффициента опасности K_o показали (рис. 3), что содержание БаП в почвах промышленных зон не превышает ПДК.

Интегральная оценка уровня загрязнения почв ПАУ показала (табл. 4), что в целом почвы зоны влияния ТЭЦ-2 характеризуются допустимым за-

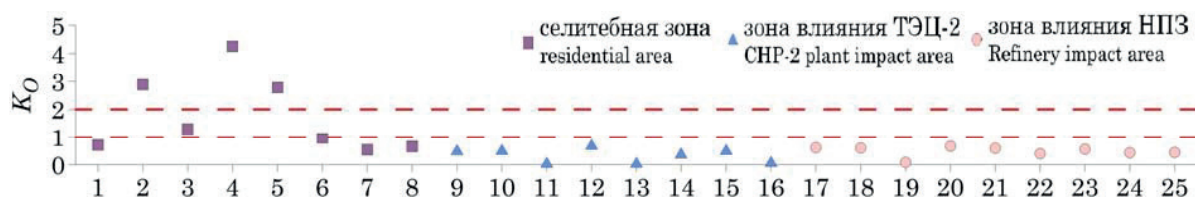


Рис. 3. Коэффициенты опасности загрязнения почв BaP

Fig. 3. Risk factor of soil contamination with BaP

грязнением ПАУ ($Z_c=14,7$), почвы зоны влияния АНПЗ – умеренно опасным ($Z_c=16,0$), а селитебной зоны – опасным ($Z_c=55,2$).

Выводы

1. В селитебной зоне широко представлены антропогенно-преобразованные и искусственно-созданные почвы тяжелого гранулометрического состава, обогащенные органическим веществом, с высокими значениями pH. Промышленные зоны АНПЗ и ТЭЦ-2 окружены защитной зоной городских лесов, в которых доминируют слабо преобразованные дерново-подзолистые почвы и почвы борových песков. Данные почвы более кислые, имеют легкий гранулометрический состав и небольшое содержание органического углерода. Различия в физико-химических свойствах приводят к более активному накоплению высокомолекулярных ПАУ в почвах селитебной зоны.
2. В поверхностном горизонте городских и фоновых почв впервые определены 12 ПАУ из списка приоритетных загрязнителей. Общая сумма ПАУ в фоновой почве составляет 113,5 мкг/кг. В групповом составе преобладают высокомолекулярные ПАУ. Наибольший вклад в составе ПАУ имеют Фен, Пир и Флт. Содержание ПАУ в городских почвах в среднем превышает фоновое в 3 раза (341 мкг/кг).
3. В селитебной зоне суммарное содержание ПАУ вдвое выше, чем в промышленных зонах ТЭЦ-2 и АНПЗ. Уровень содержания низкомолекулярных ПАУ в различных зонах примерно равен (108,4–121,6 мкг/кг), тогда как вклад

группы высокомолекулярных ПАУ наиболее значителен в почвах селитебной зоны (373,8 мкг/кг), по сравнению с промышленными (152,1–166,7 мкг/кг). Максимальные содержания Флт, БаА, БаП, ДБА, BghiП, БкФ и БбФ отмечаются в почвах зоны селитебной зоны, Пир – в почвах зоны влияния ТЭЦ-2, Флу и Фен – в почвах зоны влияния АНПЗ.

4. Почвы селитебной зоны наиболее загрязнены ПАУ вследствие более длительного и интенсивного антропогенного воздействия. Поступление ПАУ в селитебной зоне обусловлено главным образом сжиганием угля и древесины и значительной транспортной нагрузкой. Характер производственных циклов ТЭЦ-2 и АНПЗ приводит к поступлению ПАУ как непосредственно из углеводородного сырья и нефтепродуктов, так и в результате их сжигания.
5. Сумма ПАУ в почвах селитебной зоны в 4 раза превышает фоновое значение ($K_c=4,2$). В них значительно накапливаются соединения техногенного происхождения: БкФ, БаА, BghiП, БбФ и БаП. Сильное загрязнение БаП отмечается именно в почвах, приуроченных к крупным автомагистралям (K_0 до 4,3). Почвы промышленных зон слабо накапливают ПАУ ($K_c=2,4$). Содержание БаП в почвах промышленных зон не превышает ПДК. Интегральная оценка загрязнения почв ПАУ показала, что почвы селитебной зоны характеризуются опасным уровнем загрязнения, зона влияния АНПЗ – умеренно опасным, зона влияния ТЭЦ-2 – допустимым.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-35-50055 «мол.нр».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Biache C., Mansuy-Huault L., Faure P. Impact of oxidation and biodegradation on the most commonly used polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) diagnostic ratios: Implications for the source identifications // *Journal of Hazardous Materials*. – 2014. – V. 267. – P. 31–39.
2. Molecular Tracers of Saturated and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Inputs into Central Park Lake, New York City / B. Yan, T.A. Abrajano, R.F. Bopp, D.A. Chaky, L.A. Benedict, S.N. Chilrud // *Environmental Science and Technology*. – 2005. – V. 39. – № 18. – P. 7012–7019.
3. Soil pollution by PAHs in urban soils: a comparison of three European cities / E. Morillo, A.S. Romero, C. Maqueda, L. Madrid, F. Ajmone-Marsan, H. Grčman, C.M. Davidson, A.S. Hursthouse, J. Villaverde // *Journal of Environmental Monitoring*. – 2007. – № 9. – P. 1001–1008.
4. Urbanization-related changes in soil PAHs and potential health risks of emission sources in a township in Southern Jiangsu, China / H. Cao, S. Chao, L. Qiao, Y. Jiang, X. Zeng, X. Fan // *Science of The Total Environment*. – 2017. – V. 575. – P. 692–700.
5. Assessing the combined risks of PAHs and metals in urban soils by urbanization indicators / C. Peng, Z. Ouyang, M. Wang, W. Chen, X. Li, J.C. Crittenden // *Environmental Pollution*. – 2013. – V. 178. – P. 426–432.
6. Костылева Н.В., Рачёва Н.И. Характеристики загрязняющих веществ из раздела «III. Для почв» «Перечня загрязняющих

веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды», утвержденного распоряжением Правительства Российской Федерации от 08.07.2015 г. № 1316-р. Справочник. – Пермь: ФГБУ УралНИИ «Экология», 2017. – 107 с.

7. Photomutagenicity of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons from the US EPA priority pollutant list / J. Yan, L. Wang, P.P. Fu, H. Yu // *Mutation research*. – 2004. – V. 557. – № 1. – P. 99–108.
8. Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 23 января 2006 г. № 1 «О введении в действие гигиенических нормативов ГН 2.1.7.2041–06» (Регистрационный № 7470 от 7 февраля 2006 г.) // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. – 2006. – № 10. – С. 71–76.
9. Формы и факторы накопления полициклических ароматических углеводородов в почвах при техногенном загрязнении (Московская область) / А.Н. Геннадиев, Ю.И. Пиковский, С.С. Чернянский, Т.А. Алексеева, Р.Г. Ковач // *Почвоведение*. – 2004. – № 7. – С. 804–818.
10. Features of accumulation, migration, and transformation of benzo [a] pyrene in soil-plant system in a model condition of soil contamination / S. Sushkova, T. Minkina, I. Deryabkina (Turina), S. Mandzhieva, I. Zamulina, T. Bauer, G. Vasilyeva, E. Antonenko, V. Rajput, R. Kizilkaya // *Journal of Soils and Sediments*. – 2018. – V. 18. – № 6. – P. 2361–2367.

11. Maliszewska-Kordybach B., Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A. Effects of anthropopressure and soil properties on the accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the upper layer of soils in selected regions of Poland // *Applied Geochemistry*. – 2009. – V. 24. – № 10. – P. 1918–1926.
12. Influence of PAH contamination on soil ecological status / S. Sushkova, T. Minkina, I. Deryabkina (Turina), S. Mandzhieva, I. Zamulina, T. Bauer, G. Vasilyeva, E. Antonenko, V. Rajput // *Journal of Soils and Sediments*. – 2018. – V. 18. – № 6. – P. 2368–2378.
13. Monitoring of benzo [a] pyrene content in soils under the effect of long-term technogenic pollution / S. Sushkova, T. Minkina, I. Turina, S. Mandzhieva, T. Bauer, R. Kizilkaya, I. Zamulina // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2017. – V. 174. – P. 100–106.
14. Tobiszewski M., Namie?nik J. PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources // *Environmental Pollution*. – 2012. – V. 162. – P. 110–119.
15. Wang X.S. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in particle-size fractions of urban topsoils // *Environmental Earth Sciences*. – 2013. – V. 70. – № 6. – P. 2855–2864.
16. Цибарт А.С., Геннадиев А.Н. Полициклические ароматические углеводороды в почвах: источники, поведение, индикационное значение (обзор) // *Почвоведение*. – 2013. – № 7. – С. 788–802.
17. Wilcke W. SYNOPSIS Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soil – a review // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. – 2000. – V. 163. – № 3. – P. 229–248.
18. Cetin B. Investigation of PAHs, PCBs and PCNs in soils around a Heavily Industrialized Area in Kocaeli, Turkey: Concentrations, distributions, sources and toxicological effects // *Science of The Total Environment*. – 2016. – V. 560. – P. 160–169.
19. Characterization, source apportionment, and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soil of Nanjing, China / J. Yang, F. Yu, Y. Yu, J. Zhang, R. Wang, M. Srinivasulu, V.I. Vasenev // *Journal of Soils and Sediments*. – 2017. – V. 17. – № 4. – P. 1116–1125.
20. Полициклические ароматические углеводороды в почвах Васильевского острова (Санкт-Петербург) / Е.Д. Лодыгин, С.Н. Чуков, В.А. Безносиков, Д.Н. Габов // *Почвоведение*. – 2008. – № 12. – С. 1494–1500.
21. Тюменская область. База данных показателей муниципальных образований. URL: <http://www.gks.ru/dbscripts/munst/munst71/DBInet.cgi> (дата обращения 05.10.2017).
22. Гусейнов А.Н. Экология города Тюмени: состояние, проблемы. – Тюмень: Издательская фирма «Слово», 2001. – 176 с.
23. Климат Тюмени. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/28367.htm> (дата обращения 09.09.2017).
24. Физико-географическое районирование Тюменской области / под ред. Н.А. Гвоздецкого. – М.: Изд-во Московского ун-та, 1973. – 246 с.
25. Каретин Л.Н. Почвы Тюменской области. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. – 286 с.
26. Константинова Е.Ю. Разнообразие почв и техногенных почвоподобных образований города Тюмени как основа для эколого-геохимических исследований // *Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXI Международного симпозиума им. академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М.И. Кучина*. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2017. – Т. I. – С. 754–755.
27. Константинова Е.Ю. Отражение трансформации ландшафтов городских территорий в морфологических особенностях профилей почв (на примере г. Тюмень) // *Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития: материалы XII Международной ландшафтной конференции*. – Тюмень: Изд-во Тюменского государственного ун-та, 2017. – Т. 2. – С. 150–154.
28. МУ 2.1.7.730–99. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. Методические указания (утв. Минздравом РФ 07.02.1999). – М.: Минздрав РФ, 1999.
29. Теория и практика химического анализа почв / под ред. Л.А. Воробьевой. – М.: ГЕОС, 2006. – 400 с.
30. Федоренко Н.Г., Медведева М.В. Методика исследования почв урбанизированных территорий. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2009. – 84 с.
31. МУК 4.1.1274–03. 4.1. Методы контроля. Химические факторы. Измерение массовой доли бенз (а) пирена в пробах почв, грунтов, донных отложений и твердых отходов методом ВЭЖХ с использованием флуориметрического детектора. Методические указания (утв. Минздравом России 01.04.2003) // *Измерение массовой концентрации химических веществ люминесцентными методами в объектах окружающей среды: Сборник методических указаний*. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003. – С. 244–267.
32. ISO 13877–2005. Soil Quality – Determination of Polynuclear Aromatic Hydrocarbons – Method Using High-performance Liquid Chromatography. – 2005. – 20 p.
33. РД 52.10.556–95. Руководящий документ. Методические указания. Определение загрязняющих веществ в пробах морских донных отложений и взвеси (утв. Росгидрометом 04.08.1995). – М.: Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1996. – 49 с.
34. Dynamics of benzo[α]pyrene accumulation in soils under the influence of aerotechnogenic emissions / S.N. Sushkova, T.M. Minkina, S.S. Mandzhieva, I.G. Deryabkina, G.K. Vasil'eva, R. Kizilkaya // *Eurasian Soil Science*. – 2017. – V. 50. – № 1. – P. 95–105.
35. Ярошук А.В., Максименко Е.В., Борисенко Н.И. Разработка методики извлечения бенз (а) пирена из почв // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Приложение*. – 2003. – № 9. – С. 44–46.
36. Yunker M.B., Perreault A., Lowe C.J. Source apportionment of elevated PAH concentrations in sediments near deep marine outfalls in Esquimalt and Victoria, BC, Canada: Is coal from an 1891 shipwreck the source? // *Organic Geochemistry*. – 2012. – V. 46. – P. 12–37.
37. New observations on PAH pollution in old heavy industry cities in northeastern China / N. Song, J. Ma, Y. Yu, Z. Yang, Y. Li // *Environmental Pollution*. – 2015. – V. 205. – P. 415–423.
38. Апарин Б.Ф., Сухачева Е.Ю. Классификация городских почв в системе российской и международной классификации почв // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. – 2015. – Вып. 79. – С. 53–72.
39. Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е. Полициклические ароматические углеводороды в городских почвах (Москва, Восточный округ) // *Почвоведение*. – 2011. – № 9. – С. 1114–1127.
40. Maliszewska-Kordybach B. Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland: preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination // *Applied Geochemistry*. – 1996. – V. 11. – P. 121–127.
41. Wang L., Xu X., Lu X. Composition, source and potential risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in vegetable soil from the suburbs of Xianyang City, Northwest China: a case study // *Environmental Earth Sciences*. – 2016. – V. 75. – № 1. – Article 56.
42. Ma J., Zhou Y. Soil pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons: a comparison of two Chinese cities // *Journal of Environmental Sciences*. – 2011. – V. 23. – № 9. – P. 1518–1523.
43. Gabov D.N., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M., Yakovleva E.V. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the soils of technogenic landscapes // *Geochemistry International*. – 2010. – V. 48. – № 6. – P. 569–579.

Поступила 16.03.2018 г.

Информация об авторах

Константинова Е.Ю., аспирант кафедры геоэкологии Института наук о Земле Тюменского государственного университета.

Сушкова С.Н., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института биологии Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета.

Минкина Т.М., доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой почвоведения и оценки земельных ресурсов, главный научный сотрудник Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета.

Антоненко Е.М., кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета.

Константинов А.О., специалист Научно-образовательного центра «Геология нефти и газа» Тюменского индустриального университета.

Хорошавин В.Ю., кандидат географических наук, доцент, директор Института наук о Земле Тюменского государственного университета.

UDC 631.423.4

POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS IN SOILS OF INDUSTRIAL AND RESIDENTIAL AREAS OF TYUMEN

Elizaveta Yu. Konstantinova¹,

konstantliza@gmail.com

Svetlana N. Sushkova²,

terra_rossa@mail.ru

Tatiana M. Minkina²,

tminkina@mail.ru

Elena M. Antonenko²,

antonenko1102@yandex.ru

Alexandr O. Konstantinov³,

konstantinov.alexandr72@gmail.com

Vitaliy Yu. Khoroshavin¹,

purriver@mail.ru

¹ University of Tyumen,
13, Chervishevskiy trakt street, Tyumen, 625008, Russia.

² Southern Federal University,
194/1, Stachki avenue, Rostov-on-Don, 344090, Russia.

³ Tyumen Industrial University,
56, Volodarskogo street, Tyumen, 625000, Russia.

The relevance of the research is caused by the necessity to study the poorly investigated features of the priority polycyclic aromatic hydrocarbons accumulation in the urban topsoil of the city areas described by various functional purposes and industry.

The main aim of the research is qualitative and quantitative assessment of the topsoil contamination in the residential and industrial areas of the city according to the polycyclic aromatic hydrocarbons composition and content observation.

Objects of the research are urban topsoil undisturbed horizons (0–10 cm) of urban soils.

Methods: soil sampling; methods for determining physical and chemical properties of soils, extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons by saponification, high-performance liquid chromatography with fluorimetric detection using 1260 Infinity device made by Agilent (USA), statistical methods, calculation of diagnostic ratios of polycyclic aromatic hydrocarbons, hygienic and geochemical parameters.

The results. The contents of 12 priority polycyclic aromatic hydrocarbons were determined in anthropogenically altered soils: naphthalene, fluorene, phenanthrene, anthracene, fluoranthene, pyrene, benzo[a]anthracene, benzo[b]fluoranthene, benzo[k]fluoranthene, benzo[a]pyrene, dibenzo[a,h]anthracene, benzo[ghi]perylene. A wide variability of their content in urban topsoils is shown. It has been established that the increased contents of benzo[a]anthracene, benzo[b]fluoranthene, benzo[k]fluoranthene, benzo[a]pyrene and benzo[ghi]perylene determine soil contamination in the residential area, and fluorene, phenanthrene, benzo[a]anthracene and benzo[k]fluoranthene – in the soils of industrial areas. It was revealed that, on average, the total content of polycyclic aromatic hydrocarbons is twice higher in the soils of the residential area than in the soils of industrial areas. This is due to both the physical and chemical properties of soils, and the duration and intensity of anthropogenic impact. An integrated assessment of pollution showed a dangerous level of soil pollution in the residential area, moderately dangerous – in the Antipinsky Refinery impact area and the permissible – in the CHP-2 plant impact area.

Key words:

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), low molecular weight and high molecular weight PAH, urban soils, contamination, pollution, sources, functional areas.

The reported research was funded by Russian Foundation for Basic Research within the scientific project № 17–35–50055 mol_nr.

REFERENCES

1. Biache C., Mansuy-Huault L., Faure P. Impact of oxidation and biodegradation on the most commonly used polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) diagnostic ratios: Implications for the source identifications. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, vol. 267, pp. 31–39. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.12.036.
2. Yan B., Abrajano T.A., Bopp R.F., Chaky D.A., Benedict L.A., Chillrud S.N. Molecular Tracers of Saturated and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Inputs into Central Park Lake, New York City. *Environmental Science and Technology*, 2005, vol. 39, no. 18, pp. 7012–7019. DOI: 10.1021/es0506105.
3. Morillo E., Romero A.S., Maqueda C., Madrid L., Ajmone-Marsan F., Grčman H., Davidson C.M., Hursthouse A.S., Villaver-

- de J. Soil pollution by PAHs in urban soils: a comparison of three European cities. *Journal of Environmental Monitoring*, 2007, no. 9, pp. 1001–1008. DOI: 10.1039/B705955H.
4. Cao H., Chao S., Qiao L., Jiang Y., Zeng X., Fan X. Urbanization-related changes in soil PAHs and potential health risks of emission sources in a township in Southern Jiangsu, China. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 575, pp. 692–700. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.106.
 5. Peng C., Ouyang Z., Wang M., Chen W., Li X., Crittenden J.C. Assessing the combined risks of PAHs and metals in urban soils by urbanization indicators. *Environmental Pollution*, 2013, vol. 178, pp. 426–432. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.03.058.
 6. Kostyleva N.V., Racheva N.L. *Kharakteristiki zagryaznyayushchikh veshchestv iz razdela «III. Dlya pochv» «Perechnya zagryaznyayushchikh veshchestv, v otnoshenii kotorykh primenayutsya mery gosudarstvennogo regulirovaniya v oblasti okhrany okruzhayushchey sredy», utverzhennogo rasporyazheniem Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 08.07.2015 g. № 1316-r* [Characteristics of pollutants from the section «III. For soils» of the «List of pollutants subject to measures of state regulation in the field of environmental protection», approved by the decree of the Government of the Russian Federation of 08.07.2015 No. 1316-r]. Perm, UralNII «Ekologiya» Publ., 2017. 107 p.
 7. Yan J., Wang L., Fu P.P., Yu H. Photomutagenicity of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons from the US EPA priority pollutant list. *Mutation research*, 2004, vol. 557, no. 1, pp. 99–108. DOI: 10.1016/j.mrgentox.2003.10.004.
 8. Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha Rossiyskoy Federatsii ot 23.01.2006 № 1 «O vvedenii v deystvie gigienicheskikh normativov GN 2.1.7.2041–06» (Registratsionny № 7470 ot 7 fevralya 2006 g.) [Decision of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of January 23, 2006 no. 1 «On the implementation of hygiene standards of GN 2.1.7.2041–06» (Registration no. 7470 of February 7, 2006)]. *Byulleten normativnykh aktov federalnykh organov ispolnitelnoy vlasti*, 2006, no. 10, pp. 71–76.
 9. Gennadiev A.N., Pikovskiy Yu.I., Chernyanskiy S.S., Alekseeva T.A., Kovach R.G. Forms of polycyclic aromatic hydrocarbons and factors of their accumulations in soils affected by technogenic pollution (Moscow Oblast). *Pochvovedenie*, 2004, no. 7, pp. 804–818. In Rus.
 10. Sushkova S., Minkina T., Deryabkina (Turina) I., Mandzhieva S., Zamulina I., Bauer T., Vasilyeva G., Antonenko E., Rajput V., Kizilkaya R. Features of accumulation, migration, and transformation of benzo[a]pyrene in soil-plant system in a model condition of soil contamination. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 2361–2367. DOI: 10.1007/s11368-016-1634-8.
 11. Maliszewska-Kordybach B., Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A. Effects of anthropopressure and soil properties on the accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the upper layer of soils in selected regions of Poland. *Applied Geochemistry*, 2009, vol. 24, no. 10, pp. 1918–1926. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2009.07.005.
 12. Sushkova S., Minkina T., Deryabkina (Turina) I., Mandzhieva S., Zamulina I., Bauer T., Vasilyeva G., Antonenko E., Rajput V. Influence of PAH contamination on soil ecological status. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 2368–2378. DOI: 10.1007/s11368-017-1755-8.
 13. Sushkova S., Minkina T., Turina I., Mandzhieva S., Bauer T., Kizilkaya R., Zamulina I. Monitoring of benzo[a]pyrene content in soils under the effect of long-term technogenic pollution. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, vol. 174, pp. 100–106. DOI: 10.1016/j.gexplo.2016.02.009.
 14. Tobiszewski M., Namie?nik J. PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources. *Environmental Pollution*, 2012, vol. 162, pp. 110–119. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.10.025.
 15. Wang X.S. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in particle-size fractions of urban topsoils. *Environmental Earth Sciences*, 2013, vol. 70, no. 6, pp. 2855–2864. DOI: 10.1007/s12665-013-2346-7.
 16. Tsibart A.S., Gennadiev A.N. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils: Sources, behavior, and indication significance (a review). *Pochvovedenie*, 2013, no. 7, pp. 788–802. In Rus. DOI: 10.7868/S0032180X13070125.
 17. Wilcke W. SYNOPSIS Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soil – a Review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2000, vol. 163, no. 3, pp. 229–248. DOI: 10.1002/1522-2624(200006)163:3<229::AID-JPLN229>3.0.CO;2-6.
 18. Cetin B. Investigation of PAHs, PCBs and PCNs in soils around a Heavily Industrialized Area in Kocaeli, Turkey: Concentrations, distributions, sources and toxicological effects. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 560, pp. 160–169. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.04.037.
 19. Yang J., Yu F., Yu Y., Zhang J., Wang R., Srinivasulu M., Vasenev V.I. Characterization, source apportionment, and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soil of Nanjing, China. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 1116–1125. DOI: 10.1007/s11368-016-1585-0.
 20. Lodygin E.D., Chukov S.N., Beznosikov V.A., Gabov D.N. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Vasilievsky Island (St. Petersburg). *Pochvovedenie*, 2008, no. 12, pp. 1494–1500. In Rus.
 21. *Tyumenskaya oblast. Baza dannykh pokazatelei munitsipalnykh obrazovaniy* [Tyumen region. Database of indicators of municipalities]. Available at: <http://www.gks.ru/dbscripts/munst/munst71/DBinet.cgi> (accessed 05 October 2017).
 22. Guseinov A.N. *Ekologiya goroda Tyumeni: sostoyaniye, problemy* [Ecology of Tyumen: state, problems]. Tyumen, Slovo Publ., 2001. 176 p.
 23. *Klimat Tyumeni* [Climate of Tyumen]. Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/28367.htm> (accessed 09 September 2017).
 24. Gvozdetkiy N.A. *Fiziko-geograficheskoe rayonirovanie Tyumenskoy oblasti* [Physico-geographical regionalization of the Tyumen region]. Moscow, Moscow State University Publ., 1973. 246 p.
 25. Kartin L.N. *Pochvy Tyumenskoy oblasti* [The soils of the Tyumen region]. Novosibirsk, Nauka SB Publ., 1990. 289 p.
 26. Konstantinova E.Yu. Raznoobrazie pochv i tekhnogennykh pochvopodobnykh obrazovaniy goroda Tyumeni kak osnova dlya ekologo-geokhimicheskikh issledovaniy [Variety of soils and technogenic soil-like formations of the city of Tyumen as a basis for ecological and geochemical research]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XXI Mezhdunarodnogo simpoziuma im. Akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchennykh, posvyashchennogo 130-letiyu so dnya rozhdeniya professor M.I. Kuchina* [Problems of Geology and Sub-surface Development. Proc. of the 21st International Scientific Symposium of students, Postgraduates and young Scientists devoted to the 130th Anniversary of birth of M. Kuchin]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2017. P. I, pp. 754–755.
 27. Konstantinova E.Yu. Urban landscapes change reflection in morphological features of soils profiles (case study of Tyumen). *Landscape science: theory, methods, landscape-ecological support of land use and sustainable development. Proc. of the XII International landscape conference*. Tyumen, University of Tyumen Press, 2017. Vol. 2, pp. 150–154. In Rus.
 28. *MU 2.1.7.730–99. Gigienicheskaya otsenka kachestva pochvy naselennykh mest. Metodicheskie ukazaniya* [Hygienic assessment of soil quality in populated areas. Methodical instructions] (approved by the Ministry of Health of the Russian Federation on 07 February 1999). Moscow, Ministry of Health of the Russian Federation, 1999.
 29. Vorobeva L.A. *Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochvy* [Theory and practice of soils chemical analysis]. Moscow, GEOS Publ., 2006. 400 p.

30. Fedorets N.G., Medvedeva M.V. *Metodika issledovaniya pochv urbanizirovannykh territorii* [Technique of studying soils of urbanized territories]. Petrozavodsk, Karelian Research Centre RAS Publ., 2009. 84 p.
31. MUK 4.1.1274–03. 4.1. Metody kontrolya. Khimicheskie faktory. Izmerenie massovoy doli benz (a) pirena v probakh pochv, gruntov, donnykh otlozheniy i tverdykh otkhodov metodom VEZhKh s ispolzovaniem fluorimetricheskogo detektora. Metodicheskie ukazaniya [Measurement of the mass fraction of benzo [a] pyrene in samples of soils, soils, bottom sediments and solid wastes by HPLC using a fluorimetric detector. Methodological instructions]. *Izmerenie massovoy kontsentratsii khimicheskikh veshchestv lyuminestsentnymi metodami v obektakh okruzhayushchei sredy* [Measurement of mass concentration of chemicals by luminescent methods in environmental objects]. Moscow, Federalny tsentr gossanepidnadzora Minzdrava Rossii Publ., 2003. pp. 220–243.
32. ISO 13877–2005. *Soil Quality – Determination of Polynuclear Aromatic Hydrocarbons – Method Using High-performance Liquid Chromatography*. 2005. 20 p.
33. RD 52.10.556–95. *Rukovodyashchiy dokument. Metodicheskie ukazaniya. Opredelenie zagryaznyayushchikh veshchestv v probakh morskikh donnykh otlozhenii i vzvesi* [Guidance document. Methodical instructions. Determination of pollutants in samples of marine sediments and suspended matter] (approved by Rosgidromet on 04 August 1995) (revised as 03 April 2014). Moscow, Federal Service of Russia for Hydrometeorology and Environmental Monitoring Publ., 1996. 49 p.
34. Sushkova S.N., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Deryabkina I.G., Vasil'eva G.K., Kizilkaya R. Dynamics of benzo[a]pyrene accumulation in soils under the influence of aerotechnogenic emissions. *Eurasian Soil Science*, 2017, vol. 50, no. 1, pp. 95–105. DOI: 10.1134/S1064229317010148.
35. Yaroshchuk A.V., Maksimenko E.V., Borisenko N.I. Razrabotka metodiki izvlecheniya benz (a) pirena iz pochv [Development of a technique for extracting benzo [a] pyrene from soils]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Natural Sciences. Prilozhenie*, 2003, no. 9, pp. 44–46.
36. Yunker M.B., Perreault A., Lowe C.J. Source apportionment of elevated PAH concentrations in sediments near deep marine outfalls in Esquimalt and Victoria, BC, Canada: Is coal from an 1891 shipwreck the source? *Organic Geochemistry*, 2012, vol. 46, pp. 12–37. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2012.01.006.
37. Song N., Ma J., Yu Y., Yang Z., Li Y. New observations on PAH pollution in old heavy industry cities in northeastern China. *Environmental Pollution*, 2015, vol. 205, pp. 415–423. DOI: 10.1016/j.envpol.2015.07.005.
38. Aparin B.F., Sukhacheva E.Yu. Classification of urban soils in Russian soil classification system and international classification of soils. *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2015, vol. 79, pp. 53–72. In Rus.
39. Nikiforova E.M., Kosheleva N.E. Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils (Moscow, Eastern District). *Pochvovedenie*, 2011, no. 9, pp. 1114–1127. In Rus.
40. Maliszewska-Kordybach B. Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland: preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination. *Applied Geochemistry*, 1996, vol. 11, pp. 121–127. DOI: 10.1016/0883-2927(95)00076-3.
41. Wang L., Xu X., Lu X. Composition, source and potential risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in vegetable soil from the suburbs of Xianyang City, Northwest China: a case study. *Environmental Earth Sciences*, 2016, vol. 75, no. 1, art. 56. DOI: 10.1007/s12665-015-4853-1.
42. Ma J., Zhou Y. Soil pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons: A comparison of two Chinese cities. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, vol. 23, no. 9, pp. 1518–1523. DOI: 10.1016/S1001-0742(10)60592-X.
43. Gabov D.N., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M., Yakovleva E.V. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the soils of technogenic landscapes. *Geochemistry International*, 2010, vol. 48, no. 6, pp. 569–579. DOI: 10.1134/S0016702910060042.

Received: 16 March 2018.

Information about the authors

Elizaveta Yu. Konstantinova, postgraduate, University of Tyumen.

Svetlana N. Sushkova, Cand. Sc., senior researcher, Southern Federal University.

Tatiana M. Minkina, Dr. Sc., professor, head of the department, Southern Federal University.

Elena M. Antonenko, Cand. Sc., senior researcher, Southern Federal University.

Alexandr O. Konstantinov, specialist, Tyumen Industrial University.

Vitaliy Yu. Khoroshavin, Cand. Sc., associate professor, director, University of Tyumen.