

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2020

Журба О.М., Алексеенко А.Н., Шаяхметов С.Ф., Меринов А.В.

Оценка содержания загрязнений в аккумулялирующих природных средах в условиях техногенной нагрузки

ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665827, Ангарск

Введение. Для комплексного исследования урбанизированной среды используют различные природные объекты – снеговой и почвенный покров, кумулирующие атмосферные выпадения, что позволяет оценить распространение загрязнений в окружающей среде.

Цель исследования – дать оценку количественного содержания и распределения приоритетных загрязнений в системе снег/почва в результате рассеивания от техногенных источников на территории г. Шелехов.

Материал и методы. Проведены исследования содержания полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), нефтепродуктов (НП), фторидов (Ф) в снеге и почвах в условиях техногенной нагрузки. Отбор проб снега осуществляли на площадках с ненарушенным снежным покровом в период начала снеготаяния. Пробы почвы отбирали в тех же точках, где ранее отбирали пробы снега. Применяли газовую хромато-масс-спектрометрию, флуориметрические и потенциометрические методы.

Результаты. Содержание НП в образцах проб снег/почва находилось в диапазоне 0,04–0,98 мг/л/2,8–71,2 мг/кг; ΣПАУ – 2,13–134,76 мг/л/0,13–38,987 мг/кг; фториды в интервале 0,68–13,48 мг/л/1,5–61 мг/кг. Высокие концентрации поллютантов обнаружены в точках, наиболее приближенных к техногенным источникам, а также вблизи автотрасс и железнодорожного полотна. Состав ПАУ относительно однороден на всех участках опробования, в пробах снега преобладали в основном низкомолекулярные полиарены – от 52,8 до 68,5% от ΣПАУ, в пробах почвы – 5-, 6-ядерные ПАУ, доля которых варьировалась от 63,7 до 85,3% от ΣПАУ.

Заключение. Анализ полученного материала свидетельствует, что максимальные концентрации загрязнений (ПАУ, НП, фториды) на территории г. Шелехов отмечались для проб снега и почвы вблизи индустриальной зоны: в 0,35 км к югу от алюминиевого завода, а также в образце почвы, отобранного у п. Олха, на расстоянии 2,5 км от источника.

К л ю ч е в ы е с л о в а : полициклические ароматические углеводороды; нефтепродукты; фториды; снеговой покров; почва; загрязнение

Для цитирования: Журба О.М., Алексеенко А.Н., Шаяхметов С.Ф., Меринов А.В. Оценка содержания загрязнений в аккумулялирующих природных средах в условиях техногенной нагрузки. Гигиена и санитария. 2020; 99 (10): 1049-1054. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-10-1049-1054>

Для корреспонденции: Журба Ольга Михайловна, канд. биол. наук, зав. лаб. аналитической экотоксикологии и биомониторинга, ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665827, Ангарск. E-mail: zhurba99@gmail.com

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках средств, выделяемых для выполнения государственного задания ФГБНУ ВСИМЭИ.

Участие авторов: концепция и дизайн исследования, статистический обсчет, написание текста, редактирование, утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи, обработка материала – Журба О.М.; сбор материалов, проведение исследований – Алексеенко А.Н.; организация исследований, обоснование программы исследований, редактирование – Шаяхметов С.Ф.; сбор материалов, проведение исследований, статистический обсчет – Меринов А.В.

Поступила 10.07.2020

Принята к печати 18.09.2020

Опубликована 30.11.2020

Olga M. Zhurba, Anton N. Alekseenko, Salim F. Shayakhmetov, Alexey V. Merinov

Assessment of the content of pollutants in accumulating natural environments under conditions of anthropogenic load

East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation

Introduction. For a comprehensive study of the urban environment, various natural objects, there were used – snow and soil cover, accumulating atmospheric precipitation, which allows assessing the spread of pollutants in the environment.

The purpose of the study is to assess the quantitative content of priority pollutants in the snow/soil system as a result of dispersion from man-made sources.

Material and methods. Studies of the content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), petroleum products (PP), and fluorides in snow and soils under man-made loads were carried out. Snow sampling was performed at sites with undisturbed snow cover during the beginning of snowmelt. Soil samples were taken at the same points where snow samples were previously taken. Gas chromatography-mass spectrometry, fluorimetric and potentiometric methods were used.

Results. The detected PP content in samples of snow/soil samples was in the range of 0.04–0.98 mg/l/2.8–71.2 mg/kg; Σ PAH – 2.13–134.76 mg/l/0.13–38.987 mg/kg; fluoride- in the range of 0.68–13.48 mg/l/1.5–61.0 mg/kg. High concentrations of pollutants were registered at points closest to man-made sources, as well as near highways and railway tracks. The composition of PAHs is relatively uniform at all sampling sites. snow samples were mainly dominated by low-molecular polyarenes – from 52.8 to 68.5% of Σ PAH, and soil samples – 5-, 6-nuclear PAHs, the proportion of which varied from 63.7 to 85.3% of Σ PAH.

Conclusion. Analysis of the obtained material shows the maximum concentrations of pollutants (PAH, PP, Fluorides) to be observed for snow and soil samples near the industrial zone: 0.35 km South of the aluminum plant, as well as in a soil sample taken from the village of Olkha, at a distance of 2.5 km from the source.

К е у о р д с : polycyclic aromatic hydrocarbons; petroleum hydrocarbons; fluorides; snow cover; soil; pollution

For citation: Zhurba O.M., Alekseenko A.N., Shayakhmetov S.F., Merinov A.V. Assessment of the content of priority pollutants in accumulating natural environments under conditions of anthropogenic load. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2020; 99 (10): 1049-1054. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-10-1049-1054> (In Russ.)

For correspondence: Olga M. Zhurba, MD, Ph.D., head of the Laboratory of analytical ecotoxicology and biomonitoring of the East-Siberian Institution of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation. E-mail: zhurba99@gmail.com

Information about the authors:

Zhurba O.M., <https://orcid.org/0000-0002-9961-6408>; Alekseenko A.N., <https://orcid.org/0000-0003-4980-5304>; Shayakhmetov S.F., <https://orcid.org/0000-0001-8740-3133>; Merinov A.V., <https://orcid.org/0000-0001-7848-6432>

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgment. Financing of the work was carried out at the expense of funds allocated for the state assignment of the East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research.

Contribution: Zhurba O.M. – concept and design of the study, statistical processing, writing a text, editing, approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article. Alekseenko A.A. – a collection of material, analytical studies. Shayakhmetov S.F. – organization of research, justification of the research program, editing. Merinov A.V. – collection of material, analytical studies, statistical processing.

Received: July 01, 2020

Accepted: September 18, 2020

Published: November 30, 2020

Введение

В настоящее время регионы РФ с интенсивно развитой промышленностью испытывают значительные многофакторные антропогенные нагрузки, которые приводят к загрязнению поверхностных и подземных вод, атмосферного воздуха, почв и могут оказывать влияние на здоровье проживающего населения [1]. Важную группу веществ – загрязнений внешней среды составляют полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), нефтепродукты (НП) и фториды (Ф) [2–4]. Установлено, что экологическое и/или профессиональное воздействие ПАУ и НП [5] может создавать значительный риск для здоровья с формированием новообразований [6].

Высокие темпы индустриализации резко повысили содержание техногенных поллютантов в атмосферных выпадениях [7]. Согласно имеющимся в литературе сведениям, темпы атмосферных выпадений ПАУ на относительно фоновых площадках составляют, например, в Западной Европе, около 0,4–15 г/га в год [8]. В Западно-Сибирском регионе России в атмосферу поступает 86,4 т/год ПАУ, в Восточно-Сибирском регионе 100,8 т/год [9]. ПАУ устойчивы к действию природных факторов благодаря гидрофобным свойствам, малой растворимости в воде, а также замедленной микробиологической трансформации [10].

Для комплексного исследования урбанизированной среды используют различные природные объекты (снег, почва), аккумулирующие атмосферные выпадения, что позволяет оценить распространение загрязнений в окружающей среде. Изучение химических характеристик снегового и почвенного покрова даёт важную информацию о состоянии промышленных экосистем [11–14]. Вместе с тем литературных данных по количественной оценке содержания и распределения ПАУ, поступающих из атмосферы в почву и снеговой покров в промышленных центрах Восточной Сибири, недостаточно.

Территория промышленного центра Приангарья – г. Шелехов – длительное время находится в зоне влияния выбросов техногенных источников, в число которых входят токсичные вещества с канцерогенным эффектом и способностью аккумулироваться в окружающей среде [15]. На уровень загрязнения атмосферы наибольшее влияние оказывают крупнейшие в РФ предприятия цветной металлургии (филиал ПАО «Русал Братск», ЗАО «Кремний») и теплоэнергетики (Шелеховский участок Ново-Иркутской ТЭЦ), причём на долю производства алюминия приходится не менее 65% суммарных выбросов от стационарных источников по городу [16].

За последние годы уровень валовых выбросов специфических загрязняющих веществ на исследуемой территории г. Шелехов (азота оксид, азота диоксид, углерод (сажа), метан, углерода оксид, бенз(а)пирен, формальдегид) незначительно снизился и сохранялся примерно на одном уровне до 2018 г. Данные наблюдений стационарных постов с различными программами свидетельствуют, что среднегодовое содержание бенз(а)пирена составило от 3 до 3,4 ПДКсс, твёрдых фторидов – от 1,2 до 0,7 ПДКсс, среднегодовое содержание формальдегида находилось в пределах 0,5–1,5 ПДКсс [16].

Цель исследования – дать оценку количественного содержания и распределения приоритетных загрязнений в системе снег/почва в результате рассеивания от техногенных источников на территории г. Шелехов.

Материал и методы

Объектами изучения являлись аккумулирующие природные среды: почва и снег. Образцы снега и почвы отбирали на территории г. Шелехов, согласно устоявшейся розе ветров для данной территории. По официальным данным метеорологической службы, в зимний период в 2018 г. на территории исследования преобладающим направлением ветра можно назвать северо-западный, реже западный и восточный, самый редкий ветер – юго-западный. Для оценки уровня загрязнения почвенного и снегового покрова отбор проб осуществляли в точках: т. 1 – центр города, жилая зона на расстоянии 1,8 км к северо-востоку от производственной зоны; т. 2 – жилая зона на расстоянии 1,4 км в направлении север-северо-запад; т. 3 – жилые дома в северо-западном направлении на расстоянии 1,4 км от производства; т. 4 – центр города в 2 км к северу; т. 5 – центр города в 2,2 км к северу; т. 6 – в 0,14 км на северо-восток от центральной проходной алюминиевого завода; т. 7 – в 0,35 км к югу от границы промплощадки алюминиевого завода (ФЛ ПАО «РУСАЛ Братск»); т. 8 – в 2,5 км в юго-восточном направлении от алюминиевого завода у п. Олга. В качестве фона рассматривали т. 9 – посёлок в лесной зоне, за городской чертой с наветренной стороны относительно города.

Отбор проб снега в виде кернов на всю глубину 10 × 10 см осуществляли на пробных площадках с ненарушенным снежным покровом в период начала снеготаяния по рекомендациям¹. Выделение ПАУ из образцов проводили фильтрованием через картридж ТФЭ Bond Elute C18 (300 мг 3 мл), экстракцией

¹ РД 52.04.186–89. Руководство по контролю атмосферы. М.: Госгидромет, МЗ СССР, 1991.

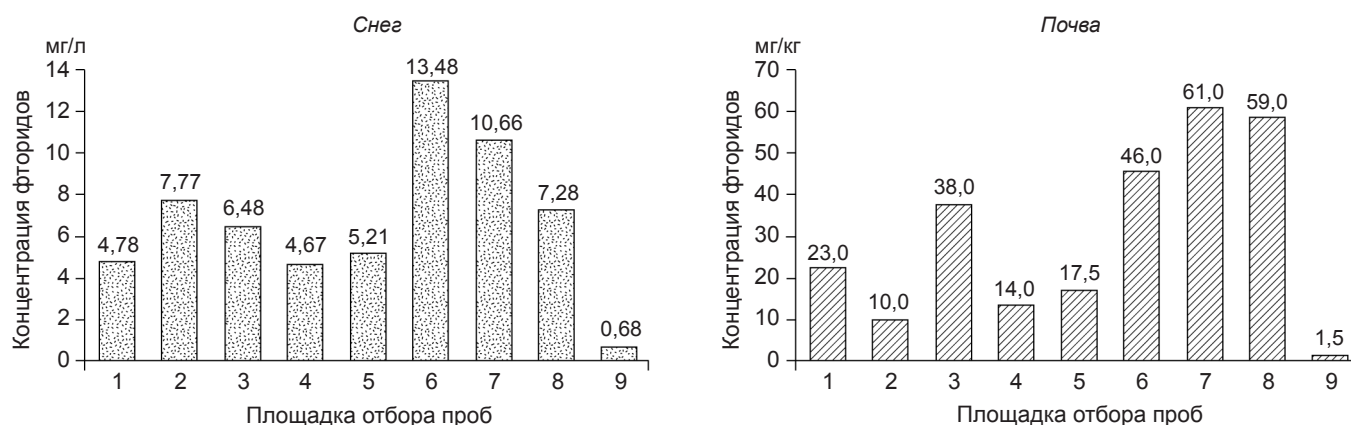


Рис. 1. Содержание фторидов в пробах снега и почвы г. Шелехов.

с дихлорметаном в ультразвуке, с последующей очисткой экстрактов. Отбор проб почвы производили в тех же точках, где ранее отбирались пробы снега, в соответствии с требованиями к отбору проб почв².

Количественное определение ПАУ в образцах почвы осуществляли методом ГХ-МС³. Анализ экстрактов образцов проводили в режиме селективного ионного мониторинга (СИМ) на Agilent 7890A с масс-селективным детектором Agilent 5975C, с установленной колонкой DB-5ht (30 м, 0,25 мм, 0,1 мкм). В каждом образце пробы талой воды определяли 13 наиболее распространённых полиаренов: флуорен (ФЛ); фенантрен (Ф); антрацен (А); флуорантен (Флу); пирен (П), бенз(а)антрацен (Б(а)А); хризен (Хр); бенз(б)флуорантен (Б(б)флу); бенз(к)флуорантен (Б(к)флу); бенз(а)пирен (Б(а)П); индено(1,2,3-с,д)пирен (ИП); дибенз(а,һ)антрацен (Д(а,һ)А) и бенз(г,һ,і)перилен (Б(г,һ,і)П). В образцах проб почвы определяли 16 ПАУ (дополнительно – нафталин (Н), аценафтилен (А(ц)Н), аценафтэн (Ацн)).

Определение нефтепродуктов проводили в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.128–98⁴. Основные физико-химические характеристики определяли в растворе талых снеговых вод потенциометрическим методом: измеряли величину рН, солесодержание (минерализацию), содержание фторидов. Определение водорастворимых фторидов в почве проводили ионоселективным методом⁵. Для представления характеристики химической нагрузки на исследуемой территории провели расчёт комплексного показателя по формуле:

$$K = \sum (C_i / C_{if}),$$

где C_i – содержание i -го вещества в пробе почвы; C_{if} – содержание i -го вещества в фоновой пробе почвы. Качественно-количественная характеристика загрязнения дана в виде формул, включающих величину превышения фонового содержания ингредиентов.

² ГОСТ 17.4.3.01-2017 Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб.

³ ISO 18287:2006. International standard. Soil quality. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). Gas chromatographic method with mass spectrometric detection (GC/MS).

⁴ ПНД Ф 14.1:2:4.128–98. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природной, питьевой и сточной воды флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02». М.: Издательство стандартов, 1998, 38 с.

⁵ МУ 2.1.7.730-99. Гигиеническая оценка качества почвы населённых мест. Методические указания. Минздрав России. М., 1999, с. 129.

Рассчитана суммарная канцерогенная активность ПАУ на основе полученных результатов для исследуемых объектов. $\Sigma \text{Т}\Sigma \text{ПАУ}$ рассчитывали по формуле:

$$\Sigma \text{Т}\Sigma \text{ПАУ} = \sum_{i=1}^n \text{КТ}\text{ПАУ}_i \cdot C_{(\text{ПАУ})_i},$$

где $\Sigma \text{КТ}\text{ПАУ}_i$ – коэффициент токсичности i -го ПАУ относительно бенз(а)пирена [9]; $C_{(\text{ПАУ})_i}$ – концентрация i -го ПАУ в объекте, мкг/л.

Статистический анализ выполнен с использованием программы Statistica 6.1 (Stat_Soft® Inc.), SNPStats в среде Windows. Проверку на нормальность распределения выполняли с использованием критерия Шапиро–Уилка. Сравнение качественных характеристик – по критерию χ^2 . Корреляцию рассчитывали с помощью коэффициентов Пирсона и Спирмана.

Результаты

Проведённые исследования показали, что значения водородного показателя отобранных проб варьировались в пределах от 5,9 до 7,1 ед. рН, что соответствует нейтральной или слабокислой областям кислотности. Величина рН снеговой талой воды обусловлена попаданием из атмосферы твёрдых частиц и газообразных загрязняющих веществ. Удельная электропроводность, характеризующая валовое содержание электролитов в снеговом покрове, находилась в интервале от 5 до 87 мкСм/см, что свидетельствует о снижении уровня солей и геохимической аномалии на исследуемой территории. Минерализация проб талой воды площадок отбора, расположенных вблизи промышленной зоны, в 10 раз и более превышала фоновое значение 4 мг/л (п. Пионерск). Наибольшие значения Ф отмечались в снеговых пробах в отметках № 7 и № 6, превышавшие значения фоновой территории в 15,7 и 19,8 раза соответственно.

Результаты определения водорастворимых фторидов в объектах окружающей среды почва/снег представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, содержание фторидов варьировалось от 1,5 до 61 мг/кг в почве с наибольшими значениями в т. № 7 – 61 мг/кг, № 6 – 46 мг/кг, т. № 8 – 59 мг/кг. В снеговых пробах содержание фторидов регистрировалось в диапазоне 0,68–13,48 мг/л с максимальными значениями в т. № 6 – 13,48 мг/л, т. № 7 – 10,66 мг/л.

Содержание НП в природных средах (снег/почва) представлено на рис. 2, где обнаруженные значения концентрации НП в образцах пробах снега и почвы составляли 0,04–0,98 мг/л и 2,8–71,2 мг/кг соответственно. Наибольшие значения отмечены на площадках отбора проб: т. № 6 (0,98 мг/л/59,8 мг/кг), т. № 8 (0,35 мг/л/71,2 мг/кг),

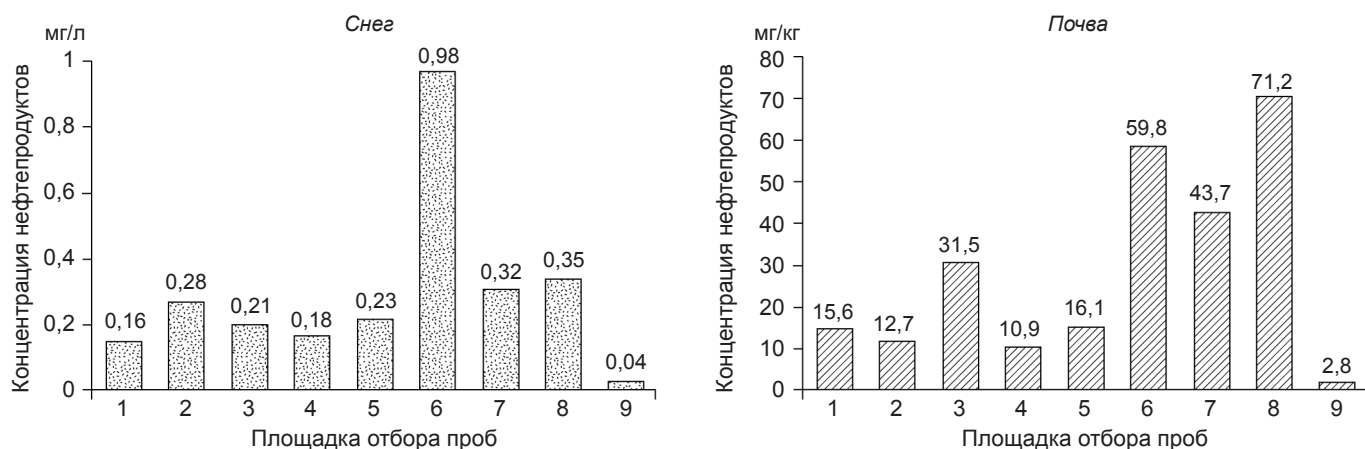


Рис. 2. Распределение концентраций нефтепродуктов в системе снег/почва различных функциональных зон: снег и почва г. Шелехов.

т. № 7 (0,32 мг/л/43,7 мг/кг). Низкие значения НП обнаружены в фоновой точке (0,04 мг/л/2,8 мг/кг).

Количественные показатели ΣПАУ в образцах проб почвы и снега на исследуемых площадках и контрольной пробе в т. № 9 (фон) представлены в таблице. Полученные значения ΣПАУ в образцах проб снег/почвы находились в пределах 2,13–134,76 мг/л/0,13–38,987 мкг/кг соответственно. Максимальные содержания суммы ПАУ в пробах снега и почвы отмечены в т. № 6 – 134,76 мкг/л³ и 38,98 мкг/кг; т. № 7 – 78,16 мкг/дм³ и 25,65 мкг/кг, находящихся под влиянием выбросов крупных предприятий цветной металлургии и Ново-Иркутской ТЭЦ, расположенных с наветренной стороны. Также высокий уровень ΣПАУ в пробах почвы отмечался в т. № 8 и составил 19,92 мкг/кг.

Установлено, что состав профилей ПАУ (распределение в долях) в пробах снеговых талых вод и почвы статистически значимо отличался от фона в следующих площадках опробования: жилые районы в городской черте – т. № 2, 3, 4; вблизи индустриальной зоны – т. № 7; т. № 8 ($\chi^2 = 19,802-34,397$; $p < 0,05$).

Состав поступающих из атмосферы ПАУ был относительно однороден на всех исследуемых площадках. В снеговых пробах определялись в основном 3-, 4-ядерные полиарены: фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз(а)антрацен, хризен. При этом данные компоненты составляли от 52,8 до 68,5% от суммарного содержания ПАУ. Наиболее тяжёлые ПАУ: бенз(б)флуорантен бенз(а)пирен, дибенз(а,һ)антрацен,

бенз(к)флуорантен, бенз(ɡ,һ,і)перилен, индено(123-сd)-пирен в снеговом покрове присутствовали в меньшем содержании и составляли от 31,4 до 47,1%. В пробах почвы преобладали 5-, 6-ядерные ПАУ, доля которых варьировалась от 63,7 до 85,3% от ΣПАУ, низкомолекулярные ПАУ составляли всего от 14,5 до 36,2% от ΣПАУ (кроме т. № 8, где вклад 3-, 4-ядерных ПАУ составил 55,1% от ΣПАУ).

Вклад канцерогенных ПАУ в природных средах: (бенз(а)-антрацен, хризен, бенз(б)флуорантен, бенз(к)флуорантен, бенз(а)пирен, индено(1,2,3-сd)пирен, дибенз(а,һ)антрацен) от ΣПАУ в среднем составил 42–57% от запасов в снеге, а в почвах этот вклад был выше и варьировался от 58 до 85,6%. Наибольшая суммарная канцерогенная активность в пробах снег/почва отмечалась в точках, расположенных вблизи предприятий: в т. № 6 – 13,28 мкг/л и 7,79 мг/кг; т. № 7 (за алюминиевым заводом) – 7,10 мкг/дм³ и 4,99 мг/кг. Также высокий показатель ТΣПАУ в пробах почвы отмечался в т. № 8 – 3,79 мг/кг.

Обсуждение

Содержание ПАУ, НП и других токсичных поллютантов, накопленных за долгие годы в почвогрунтах урбанизированных территорий, является надёжным индикатором как общего загрязнения территорий городов, так и уровня заболеваемости населения. Как показали проведённые исследования, наиболее высокие концентрации НП определялись

Таблица

Содержание ПАУ в пробах снега и почвы

Площадка отбора проб	ΣПАУ в природных средах		Вклад канцерогенных ПАУ, % от массы		Вклад бенз(а)пирена, % от массы		Суммарная канцерогенная активность	
	снег, мкг/л	почва, мг/кг	снег	почва	снег	почва	снег, мкг/л	почва, мг/кг
1	55,93	5,15	54,33	72,89	4,63	8,35	5,19	0,70
2	35,57	5,23	52,19	78,47	5,46	14,93	3,58	1,18
3	39,73	4,87	52,68	84,40	7,12	9,04	4,59	0,80
4	30,14	3,63	55,71	85,64	5,61	8,54	3,19	0,57
5	28,57	1,96	57,22	71,31	6,05	15,33	3,17	0,40
6	134,76	38,98	52,33	68,38	3,49	12,41	13,28	7,79
7	78,16	25,65	51,06	74,80	4,31	10,84	7,10	4,99
8	52,43	19,92	44,40	58,08	4,43	15,87	4,46	3,79
Фон	2,13	0,13	42,23	77,13	7,52	15,43	0,22	0,03

в пробах двух природных сред на территории г. Шелехов, отобранных вблизи к импактным техногенным источникам (т. № 6, 7, 8). Результаты согласуются с литературными данными, свидетельствующими о наибольших концентрациях НП по сравнению с фоном в пробах почвы и снега в производственной зоне и вблизи развязки автодорог [17]. Превышение НП над фоном в пробах снега и почвы в г. Шелехов отмечалось на всех зонах исследования – в 4–24,5 и 3,9–25,4 раза соответственно.

Максимальное количество водорастворимых фторидов в почве обнаружено в непосредственной близости к техногенным объектам: в отметках № 7 – 61 мг/кг, № 6 – 46 мг/кг. В жилых кварталах при удалении до 2,5 км содержание фторидов в пробах почвы снижалось в 1,6–4,3 раза: т. 3 – 38 мг/кг, т. 4 – 14 мг/кг. Содержание фторидов в пробах снег/почва во всех точках превышало содержание фона в 6,9–19,8 и в 6,7–40,7 раза соответственно.

На сегодняшний день особое внимание уделяется оценке содержания ПАУ в выбросах предприятий. К самым опасным относят 16 ПАУ, из которых, например, в Европе чаще всего встречаются бенз(а)пирен, флуорантен, бенз(б)флуорантен, где также воздействие ПАУ и НП сильно варьируется между различными регионами [8]. По данным [18], более 10% бенз(а)пирена выпадает на подстилающую поверхность в радиусе ближайших 30 км от предприятий. Основная же (до 80%) его часть перемещается вместе с тонкодисперсными аэрозолями воздуха на расстояние свыше 100 км от источника загрязнения. Дальность переноса бенз(а)пирена составляет до 2000 км.

Обнаруженное преобладание в пробах почв на территории г. Шелехов 5-, 6-ядерных ПАУ в определённой степени может быть связано с биогенным происхождением в результате трансформации органического вещества растительного опада при воздействии поллютантов [19]. В то же время относительное содержание 3-, 4-ядерных ПАУ: флуорен, флуорантен, пирен, бенз(а)антрацен, хризен, антрацен в пробах снега было выше для всех точек исследования, что обусловлено поступлением загрязнений в составе газопылевых выбросов в атмосферу [20]. Опубликованы сходные данные по составу ПАУ в снеговом покрове г. Благовещенска, определившие наиболее высокое содержание пирена, фенантрена, флуорантена, дибенз(а,х)антрацена, бензо(а)-антрацена [21].

Наиболее высокое содержание Б(а)П в системе почва/снег, превышающее значение фона в 29,4–242 раза, регистрировалось соответственно в отметке № 6, что объясняется наиболее близким расположением и высоким влиянием стационарного источника ФЛ ПАО «РУСАЛ-Братск». При этом значительное содержание Б(а)П в почве отмечено на расстоянии свыше 2,5 км к юго-востоку от техногенного источника (т. № 8 – 3,16 мкг/г), что, по-видимому, связано с преобладанием ветров северо-западного направления на территории города, использованием печного отопления в частном секторе и близостью железнодорожного полотна.

В результате корреляционного анализа данных исследований снеговых проб установлены сильные и очень сильные связи между бенз(а)пиреном и другими ПАУ (флуореном, фенантеном, антраценом, флуорантеном, пиреном, бенз(а)-антраценом, хризен, бенз(б)флуорантеном, бенз(к)флуорантеном, индено(123-с,д)пиреном, дибенз(а,х)антраценом и бенз(г,х,и)периленом) ($r_{xy} = 0,833–0,961$; $p < 0,05$). По данным проб почвы выявлены сильная и очень сильная корреляция между бенз(а)пиреном и аценафтеном, фенантеном, антраценом, флуорантеном, пиреном, бенз(а)антраценом, хризен, бенз(к)флуорантеном, индено(123-с,д)пиреном, дибенз(а,х)антраценом, бенз(г,х,и)периленом ($r_{xy} = 0,753–0,967$; $p < 0,05$).

Установлены значимые корреляции между БаП и фторидами, НП и фторидами в пробах снега ($r_{xy} = 0,925$ и $0,917$ соответственно; $p < 0,05$); БаП и НП, БаП и фториды, НП и фториды в пробах почвы ($r_{xy} = 0,75–0,914$; $p < 0,05$). При сравнении уровней БаП, НП и фторидов между пробами снега и почвы выявлены сильные связи между ними ($r_{xy} = 0,715–0,933$; $p < 0,05$).

Канцерогенная активность ПАУ зависит от вклада Б(а)П в суммарное содержание соединений: установлена статистически значимая прямая взаимосвязь суммарной канцерогенной активности ПАУ и содержания Б(а)П с коэффициентом корреляции $r_{xy} = 0,957$ и $0,983$ ($p < 0,05$) для проб снега и почвы соответственно.

Таким образом, накопленные в снеговом покрове загрязнения после снеготаяния поступают на поверхность почвы, что приводит к повышению содержания поллютантов в верхнем горизонте почвы. Проведённые исследования содержания и соотношения поллютантов в аккумулирующих природных средах свидетельствует не только об их количественном уровне в снеговом покрове и пробах почвы, но и о распределении поллютантов в системе почва/снег, что может быть использовано в качестве индикатора уровней загрязнения в зонах влияния промышленных предприятий для оценки риска здоровью проживающего населения.

Заключение

Результаты исследований аккумулирующих природных сред – почва/снеговой покров в г. Шелехов показали, что аэротехногенное воздействие на данной территории обусловлено в наибольшей степени выбросами предприятий теплоэнергетики и цветной металлургии. Состав ПАУ относительно однороден на всех участках исследования, и показал в пробах снега преобладание 3-, 4-ядерных структур: фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз(а)антрацен, хризен – от 52,8 до 68,5% от ΣПАУ, в пробах же почвы в целом преобладали 5-, 6-ядерные ПАУ, доля которых составляла от 63,7 до 85,3% от ΣПАУ. Максимальные концентрации исследуемых загрязнителей (ПАУ, НП, фториды) отмечались для проб снега и почвы вблизи индустриальной зоны: в 0,35 км к югу от алюминиевого завода, а также в образце почвы, отобранного у п. Олха, на расстоянии 2,5 км от источника.

Литература

(п.п. 5, 7, 8, 11, 14 см. References)

1. Рукавишников В.С., Ефимова Н.В., Горнов А.Ю., Зароднюк Т.С., Заборцева Т.И., Гребенщикова В.И. и соавт. Оценка среды обитания и здоровья населения в зоне размещения производства алюминия в условиях Восточной Сибири (на примере г. Шелехова). *География и природные ресурсы*. 2016; (S6): 104–7. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(104-107\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(104-107))
2. Сирин Н.В. Оценка воздействия на атмосферный воздух предприятий алюминиевой промышленности. *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о земле*. 2008; 1(1): 181–8.
3. Василевич М.И., Габов Д.Н., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М. Органическое вещество снежного покрова в зоне влияния выбросов целлюлозно-бумажного предприятия. *Водные ресурсы*. 2009; 36(2): 182–8.
4. Семенов М.Ю., Маринайте И.И. Оценка вкладов множественных источников в загрязнение территории полициклическими ароматическими углеводородами (г. Шелехов, Иркутская область). *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2014; (6): 560–8.
6. Журба О.М., Ефимова Н.В., Ханхареев С.С., Алексеев А.Н., Мерин А.В., Мадеева Е.В. и соавт. Оценка контаминации снегового покрова для выявления зон ингаляционного химического риска. *Гигиена и санитария*. 2020; 99(4): 363–7. <https://doi.org/10.33029/0016-9900-2020-99-4-363-367>

9. Майстренко В.Н., Ключев Н.А. *Эколого-аналитический мониторинг стойких органических загрязнителей*. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний; 2017.
10. Малышева А.Г., Козлова Н.Ю., Юдин С.М. Неучтённая химическая опасность процессов трансформации веществ в окружающей среде при оценке эффективности применения технологий. *Гигиена и санитария*. 2018; 97(6): 490–7. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-6-490-497>
12. Журавлева Н.В., Потокина Р.Р., Исмагилов З.Р., Хабибулина Е.Р. Загрязнение снегового покрова полициклическими ароматическими углеводородами и токсичными элементами на примере г. Новокузнецка. *Химия в интересах устойчивого развития*. 2014; 22(5): 445–54.
13. Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Власов Д.В., Терская Е.В. Геохимия снежного покрова в восточном округе Москвы. *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2012; (4): 14–24.
15. Бельх Л.И., Максимова М.А. Эколого-технологическая модернизация Иркутского алюминиевого завода и её влияние на канцерогенную опасность для города Шелехова. *Экология и промышленность России*. 2018; 22(9): 8–13. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-9-8-13>
16. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Иркутской области в 2019 году». Иркутск; 2020.
17. Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Маслова Н.В. Мониторинг содержания нефтепродуктов и азота в грунтах экологически опасного объекта и прилегающих к нему территорий. *Успехи современного естествознания*. 2017; (10): 83–9.
18. Шилина А.И. *Миграция бенз(а)пирена в окружающей среде. Комплексный глобальный мониторинг загрязнения окружающей природной среды*. Ленинград: Гидрометеоздат; 1982.
19. Цибарт А.С., Геннадиев А.Н. Полициклические ароматические углеводороды в почвах: источники, поведение, индикационное значение (обзор). *Почвоведение*. 2013; (7): 788–802. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13070125>
20. Чикидова А.Л., Завгородняя Ю.А. Полициклические ароматические углеводороды в аэральном выпадении на территории Национального парка «Лосиный остров» (г. Москва). *Экология и промышленность России*. 2014; (10): 33–7. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2014-10-33-37>
21. Котельникова И.М., Куимова Н.Г., Павлова Л.М., Сергеева А.Г., Шумилова Л.П. Полициклические ароматические углеводороды в твердых частях снежного покрова как показатели загрязнения городской атмосферы. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011; 13(1–6): 1341–6.

References

1. Rukavishnikov V.S., Efimova N.V., Gornov A.Yu., Zarodnyuk T.S., Zabortseva T.I., Grebenshchikova V.I., et al. Assessment of the environment and public health condition in the area of aluminum production facilities, Eastern Siberia (by the example of Shelekhov city). *Geografiya i prirodnye resursy*. 2016; (S6): 104–7. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(104-107\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(104-107)) (in Russian)
2. Sirina N.V. Ambient air impact assessment of aluminum production enterprises. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o zemle*. 2008; 1(1): 181–8. (in Russian)
3. Vasilevich M.I., Gabov D.N., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M. Organic matter in snow cover in the influence zone of emissions from a pulp-and-paper mill. *Vodnye resursy*. 2009; 36(2): 182–8. (in Russian)
4. Semenov M.Yu., Marinayte I.I. Evaluating contributions of multiple sources of polycyclic aromatic hydrocarbons to territory pollution (Shelekhov, Irkutsk region). *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2014; (6): 560–8. (in Russian)
5. Klöslová Z., Drimal M., Balog K., Koppová K., Dubajová J. The relations between polycyclic aromatic hydrocarbons exposure and 1-OHP levels as a biomarker of the exposure. *Cent. Eur. J. Public Health*. 2016; 24(4): 302–7. <https://doi.org/10.21101/cejph.a4179>
6. Zhurba O.M., Efimova N.V., Khankhareev S.S., Alekseenko A.N., Merinov A.V., Madeeva E.V., et al. Assess of contamination of the snow cover for detecting the zones of inhalation chemical risk. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2020; 99(4): 363–7. <https://doi.org/10.33029/0016-9900-2020-99-4-363-367>. (in Russian)
7. Wang J., Chen S., Tian M., Zheng X., Gonzales L., Ohura T., et al. Inhalation cancer risk associated with exposure to complex polycyclic aromatic hydrocarbon mixtures in an electronic waste and urban area in South China. *Environ. Sci. Technol.* 2012; 46(17): 9745–52. <https://doi.org/10.1021/es302272a>
8. Willeke W. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil – a review. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.* 2000; 163(3): 229–48. [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200006\)163:3<229::AID-JPLN229>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200006)163:3<229::AID-JPLN229>3.0.CO;2-6).
9. Maystrenko V.N., Klyuev N.A. *Environmental and Analytical Monitoring of Persistent Organic Pollutants [Эколого-аналитический мониторинг стойких органических загрязнителей]*. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy; 2017. (in Russian)
10. Malysheva A.G., Kozlova N.Yu., Yudin S.M. The unaccounted hazard of processes of substances transformation in the environment in the assessment of the effectiveness of the application of technologies. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2018; 97(6): 490–7. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-6-490-497> (in Russian)
11. Domínguez-Morueco N., Augusto S., Trabolón L., Pocurull E., Borrull F., Schuhmacher M., et al. Monitoring PAHs in the petrochemical area of Tarragona County, Spain: comparing passive air samplers with lichen transplants. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2017; 24(13): 11890–900. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5612-2>
12. Zhuravleva N.V., Potokina R.R., Ismagilov Z.R., Khabibulina E.R. Pollution of snow cover with polycyclic aromatic hydrocarbons and toxic elements for Novokuznetsk as example. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*. 2014; 22(5): 445–54. (in Russian)
13. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Terskaya E.V. Geochemistry of snow cover within the eastern district of Moscow. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*. 2012; (4): 14–24. (in Russian)
14. Ariya P.A., Dastoor A., Nazarenko Y., Amyot M. Do snow and ice alter urban air quality? *Atm. En.* 2018; 186: 266–8. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.05.028>
15. Belykh L.I., Maksimova M.A. Eco-technological modernization of the Irkutsk aluminum plant and its impact on carcinogenic hazard to Shelekhov. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2018; 22(9): 8–13. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-9-8-13> (in Russian)
16. State report «On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Irkutsk region in 2019». Irkutsk; 2020. (in Russian)
17. Kochetova Zh.Yu., Bazarskiy O.V., Maslova N.V. Content monitoring of oil and nitrogen in the soil of ecologically dangerous object and the surrounding regions. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2017; (10): 83–9. (in Russian)
18. Shilina A.I. *Migration of Benz(a)pyrene in the Environment. Comprehensive Global Monitoring of Environmental Pollution [Migratsiya benz(a)pirena v okruzhayushchey srede. Kompleksnyy global'nyy monitoring zagryazneniya okruzhayushchey prirodnoy sredy]*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1982. (in Russian)
19. Tsibart A.S., Gennadiev A.N. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils: sources, behavior, and indication significance (a review). *Pochvovedenie*. 2013; (7): 788–802. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13070125> (in Russian)
20. Chikidova A.L., Zavgorodnyaya Yu.A. Polycyclic aromatic hydrocarbons in aerial fallout on the territory of national park «Losinyy Ostrov» (Moscow). *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2014; (10): 33–7. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2014-10-33-37> (in Russian)
21. Kotelnikova I.M., Kuimova N.G., Pavlova L.M., Sergeeva A.G., Shumilova L.P. Polycyclic aromatic hydrocarbons in firm particles of snow cover as the indicators of city atmosphere pollution. *Izvestiya Samarского nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2011; 13(1–6): 1341–6. (in Russian)