https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-261-279
УДК 631.417.7:547.6:504.5

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ ORIGINAL ARTICLE

ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИЕ АРОМАТИЧЕСКИЕ УГЛЕВОДОРОДЫ В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА КАК ИНДИКАТОРЫ ВЛИЯНИЯ ИСТОЧНИКОВ ТЕХНОГЕННЫХ ЭМИССИЙ

Ю.А. ЗАВГОРОДНЯЯ[1], О.Б. ПОПОВИЧЕВА[2], В.О. КОБЕЛЕВ[3], Д.П. СТАРОДЫМОВА[4], В.П. ШЕВЧЕНКО[4], Н.С. КАСИМОВ[1]*

[1] — *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

[2] — *Научно-исследовательский институт ядерной физики им Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

[3] — *Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия*

[4] — *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*

[*] *olga.popovicheva@gmail.com*

Резюме

Проведен анализ содержания и состава полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в твердой фракции снежного покрова Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО). Определено суммарное содержание десяти 3–6-ядерных ПАУ в 51 пробе, отобранной на различных расстояниях от объектов топливно-энергетического комплекса, у автодорог, вблизи населенных пунктов и в удаленных арктических районах. Суммарное содержание ПАУ варьирует от 0,3 нг/мг на о. Белый, повышенного ~5 нг/мг в районах разработки новых газовых месторождений до высоких 15 нг/мг в городах ЯНАО. Выделены характерные черты состава ПАУ под влиянием эмиссий газовых факелов в центральных районах высокой техногенной нагрузки при содержании до 144 нг/мг и обогащение низкомолекулярными ПАУ. В удаленных арктических регионах доминируют высокомолекулярные 5-, 6-ядерные ПАУ. Определены профили индивидуальных ПАУ вблизи факельных установок сжигания природного газа, транспортных магистралей и объектов жилого сектора. Процентный вклад суммы 3-, 4- и 5–6-ядерных ПАУ в суммарное содержание ПАУ указывает на степень влияния эмиссий факельных установок. Индикаторные показатели: отношения флуорантена к пирену и бенз(b)флуорантена к бенз(ghi)перилену — описывают изменение состава ПАУ в твердой фракции снега при снижении вклада факельных эмиссий. Полученные данные о влиянии эмиссий на состав ПАУ снежного покрова в зонах действия техногенных источников актуальны для полярных районов освоения новых месторождений.

Ключевые слова: Арктика, загрязнения, полициклические ароматические углеводороды, снежный покров, факельные установки.

Для цитированя: *Завгородняя Ю.А., Поповичева О.Б., Кобелев В.О., Стародымова Д.П., Шевченко В.П., Касимов Н.С.* Полициклические ароматические углеводороды в снежном покрове Ямало-Ненецкого автономного округа как индикаторы влияния источников техногенных эмиссий // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 3. С. 261–279. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-261-279.

Поступила 15.03.2021 **После переработки 07.07.2021** **Принята 07.09.2021**

POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS IN THE SNOWPACK OF YAMAL-NENETZ AUTONOMOUS REGION AS INDICATORS OF ANTHROPOGENIC SOURCE INFLUENCE

YULIYA A. ZAVGORODNYAYA[1], OLGA B. POPOVICHEVA[2], VASILY O. KOBELEV[3], DINA P. STARODYMOVA[4], VLADIMIR P. SHEVCHENKO[4], NIKOLAY S. KASIMOV[1]*

1 — Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

2 — Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

3 — Scientific center of Arctic Research, Salekhard, Russia

4 — Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

[*]olga.popovicheva@gmail.com

Summary

A study of the content and composition of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the solid fraction of the snowpack is carried out on the territory of the Yamal-Nenetz Autonomous region, the north of Western Siberia. The total content of ten three-six nucleus PAHs was determined in the 51 samples collected at various distances from oil and gas producers and roads, near settlements, and in remote Arctic areas. The total PAH content varies from the lowest 0.3 ng/mg on the Bely Island, increasing to ~ 5 ng/mg in areas of new gas fields, and up to high 15 ng/mg in cities. Characteristic features of PAHs composition under the influence of gas flares emissions in central areas of high technogenic load are identified; they are a total content of up to 144 ng/mg and enrichment with low- molecular weight PAHs. In remote Arctic regions, high-molecular weight 5–6 nucleus PAHs dominate. Profiles of individual PAHs near gas flares, roads and residential sector facilities have been determined. The percentage contribution of the sum of 3, 4 and 5, 6-nucleus PAHs to the total PAH content indicates the gas flaring impact. Ratios of fluorantene to pyrene and benzene(b)fluorantene to benzene(ghi)perylene indicate changes in the snow PAHs composition with a decrease in the gas flaring contribution. The data obtained for the assessment of gas flaring emission impact on the PAHs composition in the snowpack are relevant to polar areas where new fields are being developed.

Keywords: Arctic, gas flares, pollution, polycyclic aromatic hydrocarbons, snow cover.

For Citation: *Zavgorodnyaya Yu.A., Popovicheva O.B., Kobelev V.O., Starodymova D.P., Shevchenko V.P., Kasimov N.S.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in the snowpack of Yamal-Nenetz Autonomous region as indicators of anthropogenic source influence. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (3): 261–279. [In Russian]. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-261-279.

Received 15.03.2021 **Revised 07.07.2021** **Accepted 07.09.2021**

ВВЕДЕНИЕ

Север Западной Сибири является одним из индустриально-развитых регионов. На территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) добывается 85 % российского и 20 % мирового природного газа [1]. Ежегодные выбросы вредных веществ от стационарных и передвижных источников в ЯНАО составляют 856 тыс. тонн [1], поэтому уровень техногенного воздействия при освоении недр является определяющим в формировании экологической обстановки на всей территории округа.

Комплексные геоэкологические исследования севера Западной Сибири в пределах ЯНАО показали сильный и умеренный уровни загрязнения углеводородами и тяжелыми металлами в локальном масштабе вблизи скважин и объектов промысловой инфраструктуры [2]. Характеристики снежного покрова вблизи объектов

топливно-энергетического комплекса (ТЭК) и транспортных магистралей отличаются от удаленного малонаселенного арктического района Ямала увеличением степени закисления от нейтрального до слабокислого и кислого [3, 4].

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) — класс органических соединений, состоящих из двух или более сконденсированных бензольных колец; они относятся к стойким органическим загрязняющим веществам, определяющим геохимические маркеры загрязнений [5]. ПАУ подразделяются на пирогенные, образовавшиеся в результате неполного сгорания ископаемых топлив и биомасс, и петрогенные нефтяного происхождения, а также образующиеся в диагенетических процессах (перилен). Они обладают высокой устойчивостью, токсичными, мутагенными и канцерогенными свойствами [5], что определяет актуальность исследований их распространения в окружающей среде.

Пирогенные ПАУ накапливаются в нижних слоях атмосферы в составе мелкодисперсных аэрозолей, в наземные экосистемы они поступают в результате сухого и мокрого осаждения при доминировании последнего [6]. От локальных источников (хозяйственных объектов, автомагистралей) аэрозольные эмиссии выпадают на расстоянии сотни метров [7]. Вблизи крупных городов и промышленных районов повышенный уровень ПАУ формируется на территориях в радиусе от 10 до 50 км [8–10]. В составе аэрозолей ПАУ могут переносится воздушными массами на сотни и тысячи километров от источника эмиссии [11]. Для 4-ядерных ПАУ фотоокислительная деградация на поверхности частиц аэрозолей происходит более интенсивно по сравнению с 5–6-ядерными [12], что приводит к накоплению высокомолекулярных полиаренов в снежном покрове при увеличении дальности переноса от источников эмиссий.

Исследования загрязнений окружающей среды продуктами антропогенной деятельности показали увеличенные концентрации органических компонентов в снежном покрове Арктики, возможно, связанные с более быстрыми климатическими изменениями в этом регионе в глобальном масштабе [13]. Высокие концентрации ПАУ характеризуют загрязнения проб снега в поселках, вблизи автодорог и промышленных предприятий на архипелаге Шпицберген [14]. Следовые количества ПАУ наблюдаются в удаленных районах высокоширотной Арктики, на Баренцево-Карском шельфе и хребте Менделеева в центральной части Северного Ледовитого океана [15].

Соотношение концентраций различных ПАУ в окружающей среде указывает на их происхождение [16]. Показатель суммарного содержания неалкилированных ПАУ широко используется для оценки уровня антропогенной загрязненности экосистемы [17]. Анализ профилей незамещенных полиаренов или их производных позволяет сравнивать источники поступления ПАУ [18]. Рассчитывают и индикаторные показатели ПАУ с разным числом ядер для оценки вклада пирогенных и петрогенных источников, в том числе автомобильного транспорта, отопительных систем, установок сжигания мусора, угля и переработки нефти [19].

По оценкам [20], до 30 % всех промышленных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу приходится на нефтегазовый сектор экономики. Эмиссии сжигания попутного нефтяного газа (ПНГ) на российских территориях превышают все другие нефтедобывающие регионы мира; по объему сжигания ПНГ лидируют индустриальные регионы Центральной и Западной Сибири [21]. Распространение

сконденсированных на аэрозолях канцерогенных и экологически опасных соединений на большие расстояния приводит к загрязнению снежного покрова, почвы и поражению растительных сообществ [22]. Однако из-за значительной изменчивости состава нефти и технологических условий сжигания на факельных установках физико-химические свойства эмиссий остаются наименее изученными среди всех источников эмиссий горения природных топлив [23]. Аэрозольное загрязнение снежного покрова нефтегазовыми факелами остается предметом актуальных научных исследований [24]. Аэрозольный состав атмосферы Арктического региона особо чувствителен к переносу крупномасштабных эмиссий от сжигания природного газа и ПНГ [25], что ставит актуальную задачу анализа концентраций ПАУ, поступающих с техногенными выбросами и накапливающихся в твердой фракции снега, а также оценки вклада индустриальных источников в состав ПАУ на основе характерных индикаторных показателей.

Данная работа посвящена анализу содержания и состава ПАУ в твердофазной фракции снежного покрова ЯНАО вблизи зон действия техногенных источников и на удалении от них. Задачами исследования являлись поиск количественных закономерностей и взаимосвязей между концентрациями ПАУ, локальными и региональными источниками, а также определение индикаторных показателей влияния эмиссий факельных установок сжигания попутного нефтяного газа объектов ТЭК.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования загрязнения снежного покрова проводились в субарктических и арктических районах ЯНАО. Климат этой территории характеризуется среднегодовой температурой –8 °С и количеством осадков 450 мм, устойчивым снежным покровом с октября по май. Отбор проб снега проводился в апреле 2018 и 2019 гг., в период максимального снегонакопления перед началом таяния. Была отобрана 51 проба снега, все пробы пронумерованы по меридиану с севера на юг и нанесены на карту (рис. 1). Координаты и описание представлены в табл. 1. Выбирались места различной интенсивности техногенного воздействия локальных и региональных источников, а именно:

– вблизи факельных установок сжигания попутного нефтяного газа на разном удалении от установок (150 и 300 м, 1 и 1,5 км) (GF1–GF4);

– вблизи факельных установок сжигания попутного нефтяного газа крупнейших объектов ТЭК центральных районов ЯНАО, расположенных южнее и восточнее Ямальского полуострова и реки Оби (пробы Yar1-2, Yar3-4; NUr1-2; Gub1-5; GF1-4, TSale1-2);

– вблизи автодорог (пробы Gub5 — 20 м от полотна, Gub3-4 — 100 м от дороги);

– в 20–30 км от городов Ноябрьск (Nbr1-2) и Новый Уренгой (NUr1-2), в черте города Надым (Ndm1-4), в 2–3 км от поселков Правохеттинский (PHet1-2) и Ягельный (Yag1-2), где значительно смешанное влияние пирогенных эмиссий антропогенного генезиса, нефтедобывающих установок, комплексов подготовки газа и компрессорных станций, бытовых отопительных систем населенных пунктов, транспортных сетей, свалок твердых коммунальных отходов (ТКО);

– в удаленном от техногенных выбросов арктическом районе, на территории полуострова Ямал (Ya1, Ya2, Ya6) и острова Белый (проба iBely), а также вблизи порта Сабетта (Ya3), поселков Тадибеяха (Ya4) и Бованенково (Ya5), где недавно началась разработка газовых месторождений.

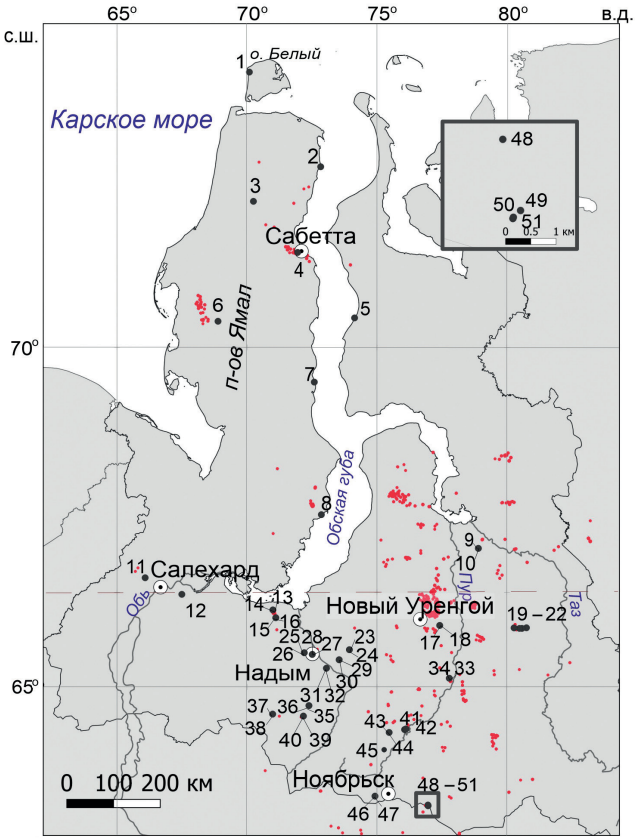

Рис. 1. Карта отбора проб снежного покрова на территории ЯНАО. Номера точек отбора соответствуют приведенным в табл. 1. Красными точками обозначены факелы сжигания природного газа на объектах ТЭК

Fig. 1. Map of snowpack sampling on the YNAO territory. The sampling point numbers correspond to Table 1. The red dots denote the natural gas flares at fuel and energy facilities

Местонахождения объектов ТЭК в период 2018–2019 гг. были определены по спутниковым данным аномального свечения в видимом и инфракрасном диапазоне, получаемым с использованием радиометра VIIRS информационной системой FIRMS [26] (см. рис. 1).

Пробы снега отбирали из прямоугольных шурфов площадью 150–1000 см^2 на всю глубину, исключая нижние 2–3 см на контакте с почвенным покровом, с помощью предварительно отмытого совка из химически стойкого полимерного материала. Во избежание загрязнения проб отбор производился с подветренной стороны в комбинезонах из безворсового материала и в полиэтиленовых перчатках. Методика отбора снега из шурфа обеспечивает получение пробы большого объема, что особенно важно в условиях низкой концентрации твердых частиц в удаленных районах [27], и была неоднократно опробована в природных зонах тайги и тундры [28–30]. Для количественных оценок и идентификации источников эмиссии более надежные результаты дает определение ПАУ в осадочном веществе [16].

Из пробы снега удаляли фрагменты высших растений, затем снег помещали в предварительно отмытые полимерные баки и доставляли в лабораторию. Из пробы талой воды отбирали при перемешивании аликвотные части объемом 1–2 л, которые фильтровали под вакуумом через предварительно взвешенные ядерные лавсановые фильтры с диаметром пор 0,45 мкм для дальнейшего определения концентрации твердых частиц ($C_{тв}$) и через предварительно прокаленные кварцевые фильтры Whatman QMA для изучения состава ПАУ. Таяние при комнатной температуре и последующая фильтрация позволили избежать значительных потерь компонентов твердой фракции проб снега [31].

Экстракцию ПАУ из высушенных кварцевых фильтров с осадком проводили хлороформом с использованием системы ускоренной автоматической экстракции субкритическими растворителями ASE 200 (Dionex). Растворитель отгоняли под вакуумом на роторном испарителе, концентрируя пробу до конечного объема 0,025–0,05 мл. Количественное определение ПАУ проводили после растворения пробы в ацетонитриле методом обратнофазной хроматографии высокого давления на жидкостном хроматографе Agilent 1260 (Agilent Technologies, USA) с флюориметрическим детектором и системой обработки данных ChemStation, HPChem; колонка — Zorbax Extend-C18, 5мкм, 4,6×150 мм, элюент — ацетонитрил-вода. В качестве стандарта использовали комплект аттестованных растворов ПАУ в ацетонитриле СОП 0118-03 ER-PAH. Погрешность метода составляет 15 %.

Во взвеси снега определялось суммарное содержание десяти индивидуальных ПАУ: 3-ядерных — фенантрена, антрацена; 4-ядерных — флуорантена, пирена, бенз(a)антрацена, хризена; 5-ядерных — бенз(b)флуорантена, бенз(k)флуорантена, бенз(a)пирен и 6-ядерных — бенз(ghi)перилена. Количественное определение содержания 2–3-ядерных ПАУ с молекулярной массой меньше 178 не проводилось из-за крайне низкого их содержания в пробах. Рассчитывалось суммарное содержание высокомолекулярных (ВМ) 5–6-ядерных и низкомолекулярных (НМ) 3–4-ядерных ПАУ. Проведен сравнительный анализ профилей ПАУ (процентного содержания каждого индивидуального соединения от суммы всех ПАУ) для проб, отобранных вблизи определенных источников, а также в удаленных малонаселенных районах. Для анализа подобия проб твердой фракции снежного покрова по составу использован кластерный анализ, где мерой сходства служила величина $(1 - r)$, где r — коэффициент корреляции Пирсона, а расстояние между кластерами вычислялось методом минимума дисперсии с помощью алгоритма Уорда.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Суммарное содержание ПАУ

Проведенный анализ состава снежного покрова на территории ЯНАО позволяет оценить уровень загрязнений, накапливающихся в субарктических и арктических районах под действием индустриальных выбросов и смешанных пирогенных эмиссий антропогенного генезиса. Концентрации твердых частиц $C_{тв}$ в талой воде (твердой фракции снега), характеризующие количество взвешенного вещества в местах отбора проб, изменялись от 0,2 до 28 мг/л (см. табл.). Значительное превышение $C_{тв}$ в 10 и более раз относительно среднего наблюдается только для наиболее загрязненных мест отбора, расположенных рядом с факельными установками на объектах ТЭК в пробах GF2 и GF3 и на расстоянии менее 20 м от автомагистрали (Gub5).

Таблица

Table

Концентрации твердой фракции снега и состав ПАУ (НМ — низкомолекулярных и ВМ — высокомолекулярных) в снеге различных районов ЯНАО

Concentration of the solid fraction and PAH composition (high and low-molecular weight) in the snowpack of different YNAO regions

№ станции	Обозначение	N°	E°	Расстояние до источника, км			$C_{тв}$, мг/л	НМ ПАУ, нг/мг	ВМ ПАУ, нг/мг
				Населенный пункт	Дорога	Месторождение			
1	iBely	73,34	70,09	Сабетта, 255	–	Южно-Тамбейское, 270	1,0	0,0	0,23
2	Ya1	72,25	72,83	Сабетта, 105	–	Южно-Тамбейское, 150	0,2	0,0	1,4
3	Ya2	71,84	70,25	Сабетта, 90	–	Южно-Тамбейское, 105	0,7	0,0	0,8
4	Ya3	71,22	71,95	Сабетта, 6	1	Южно-Тамбейское, 6	1,1	3,9	1,5
5	Ya4	70,39	74,14	Тадибеяха, 0,5	–	Южно-Тамбейское, 120	0,2	0,0	0,6
6	Ya5	70,34	68,88	Бованенково, 0,16	2,5	Бованенковское, 10	1,0	1,7	0,7
7	Ya6	69,54	72,59	Сабетта, 190	–	Южно-Тамбейское, 212	0,5	0,3	0,7
9	Taz1	67,17	78,90	Тазовский, 32	0,5	Заполярное, 41	0,3	10,8	5,5
10	Taz2	67,17	78,90	Тазовский, 32	0,5	Заполярное, 41	0,4	13,3	7,0
11	Harp	66,72	66,08	Харп, 13	0,2	Ярудейское, 230	0,5	0,6	1,5
12	Slh	66,47	67,49	Салехард, 16	0,2	Ярудейское, 165	0,3	0,8	4,5
13	Yar1	66,23	71,00	Надым, 100	0,3	Ярудейское, 3,5	1,5	5,3	1,7
14	Yar2	66,23	71,00	Надым, 100	0,3	Ярудейское, 3,5	1,0	3,7	1,0
15	Yar3	66,11	71,11	Надым, 100	0,3	Ярудейское, 10	1,1	3,5	0,8
16	Yar4	66,11	71,11	Надым, 100	0,3	Ярудейское, 10	0,8	7,1	1,3
17	NUr1	65,98	77,42	Новый Уренгой, 32	1,1	Ново-Уренгойское, 8	0,4	17,0	4,7
18	NUr2	65,98	77,41	Новый Уренгой, 32	1,1	Ново-Уренгойское, 8	0,6	11,9	5,1
23	Pang1	65,60	73,94	Пангоды, 37	0,5	Медвежье, 40	0,8	8,0	1,7
24	Pang2	65,60	73,94	Пангоды, 37	0,5	Медвежье, 40	0,5	10,1	1,5
25	Ndm1	65,55	72,20	Надым, 15	0,5	Ярудейское, 72	0,6	4,2	3,4
26	Ndm2	65,55	72,20	Надым, 15	0,5	Ярудейское, 72	1,4	0,5	1,8
27	Ndm3	65,53	72,51	Надым, 0,1	0,1	Ярудейское, 95	1,0	11,2	4,6
28	Ndm4	65,52	72,51	Надым, 0,5	0,5	Ярудейское, 95	1,6	3,1	1,6
29	PHet1	65,44	73,55	Правохеттинский, 3	0,5	Ново-Уренгойское, 146	1,0	7,2	0,8

Окончание таблицы

End of the table

№ станции	Обозначение	N°	E°	Расстояние до источника, км			$C_{тв}$, мг/л	НМ ПАУ, нг/мг	ВМ ПАУ, нг/мг
				Населенный пункт	Дорога	Месторождение			
30	PHet2	65,44	73,55	Правохеттинский, 3	0,6	Ново-Уренгойское, 146	0,6	9,6	1,4
32	Ndm6	65,30	73,06	Надым, 35	0,8	Ярудейское, 134	0,6	15,3	4,4
33	TSale1	65,14	77,78	Тарко-Сале, 25	0,8	Западно-Таркосалинское, 5,8	0,7	6,6	4,2
34	TSale2	65,14	77,78	Тарко-Сале, 25	0,8	Западно-Таркосалинское, 5,8	0,8	3,2	2,3
35	Yag1	64,69	72,38	Ягельный, 2	1	Средне-Хулымское, 58	0,7	6,6	2,7
36	Yag2	64,69	72,38	Ягельный, 2	1	Средне-Хулымское, 58	0,5	21,5	4,9
37	Long1	64,55	70,99	Лонгюган, 26	0,5	Средне-Хулымское, 12	0,8	18,6	5,0
38	Long2	64,55	70,99	Лонгюган, 26	0,5	Средне-Хулымское, 12	0,5	26,6	4,4
39	Yag3	64,52	72,17	Ягельный, 23	0,5	Средне-Хулымское, 44	0,6	12,8	4,6
40	Yag4	64,52	72,17	Ягельный, 23	0,5	Средне-Хулымское, 44	0,4	11,6	3,3
41	Gub1	64,30	76,11	Губкинский, 23	0,5	Аркатойский, 0,5	1,0	18,2	3,8
42	Gub2	64,30	76,11	Губкинский, 23	0,5	Аркатойский, 0,4	1,0	4,5	4,1
43	Gub3	64,29	76,06	Губкинский, 26	0,1	Аркатойский, 3,5	0,9	12,1	3,8
44	Gub4	64,29	76,06	Губкинский, 26	0,1	Аркатойский, 3,5	2,3	4,7	1,4
45	Gub5	64,25	75,47	Губкинский, 50	0,02	Аркатойский у, 21	28,0	4,4	1,9
46	Nbr1	63,15	74,92	Ноябрьск, 24	0,5	Новогодний, 92	0,8	10,1	4,7
47	Nbr2	63,15	74,92	Ноябрьск, 24	0,5	Новогодний, 92	0,9	7,6	5,5
48	GF4	63,00	76,33	Ноябрьск, 75	0,3	Факел ПНГ, 1,5	1,2	87,8	56,8
49	GF1	62,97	76,33	Ноябрьск, 75	1,1	Факел ПНГ, 0,1	1,4	10,7	4,9
50	GF2	62,97	76,33	Ноябрьск, 75	1,2	Факел ПНГ, 0,015	20,0	225	124
51	GF3	62,97	76,33	Ноябрьск, 75	1,2	Факел ПНГ, 0,03	13,8	53,9	41,9

На полуострове Ямал с низким уровнем техногенной нагрузки (кроме Ya3 и Ya5) НМ ПАУ оказались ниже чувствительности метода определения, а ВМ ПАУ обнаружены при концентрациях 0,28 нг/мг (см. табл.). В районах, расположенных южнее и восточнее Ямальского полуострова и р. Оби, твердая фракция снега обогащена НМ ПАУ, что указывает на высокий вклад локальных источников и ближнего переноса [16].

Суммарное содержание ПАУ в твердой фракции снежного покрова отражает влияние техногенных источников. Общим признаком проб, отобранных в малонаселенной арктической зоне на полуострове Ямал (Ya1-2, Ya4,6) и острове Белый (iBely), является относительно невысокое содержание ПАУ(0,3–1,4 нг/мг). В районах разработки новых газовых месторождений: вблизи порта Сабетта (Ya3) и поселка Бованенково (Ya5) — содержание ПАУ повышается до 2–5 нг/мг. Подобные величины наблюдались также в зонах антропогенного влияния городов: Харп (Harp), Салехард (Slh) и Надым (Ndm1, Ndm2,4). Высокие, более 15 нг/мг, значения были зафиксированы вблизи автомобильных дорог (Gub3, Ndm3), полигона ТБО (Yag2) и компрессорной станции (Ndm6).

Распределение полей аэрозольного загрязнения снежного покрова вокруг нефтегазовых факелов определяется турбулентным режимом ветра в этой области [24]. Самым высоким содержанием (350 нг/мг) характеризуется проба GF1, отобранная на расстоянии менее 100 м от факельной установки сжигания ПНГ. На расстоянии более 1 км от того же объекта в пробе GF4 содержание ПАУ падает до 144 нг/мг. Σ10ПАУ на расстоянии 3,5–10 км от месторождений Западно-Таркосалинского (TSale1,2) и Ярудейского (Yar1,4) варьируется в диапазоне 5–10 нг/мг. На сходном расстоянии от Ново-Уренгойского (NUr1,2) и Средне-Хулымского (Long1,2) месторождений содержание ПАУ в 2–3 раза выше из-за разницы в преобладающем направлении ветра в месте отбора. Тазовский район оказывается в зоне влияния атмосферного переноса эмиссий крупного газового месторождения Заполярное, расположенного на 41 км южнее, что приводит к накоплению ПАУ до 20 нг/мг в пробах Taz1,2 (см. табл.).

Состав ПАУ

Процентное содержание индивидуальных соединений от суммы всех ПАУ вблизи источников эмиссий определяет их профиль (рис. 2). Профиль ПАУ проб GF2, GF3 и GF4, отобранных вблизи факельных установок, выражается в высокой доле пирена (25–30 %), бенз(ghi)перилена (20–25 %), бенз(а)пирена (5 %) при относительно низком содержании фенантрена и флуорантена (рис. 2*а*). Такой состав ПАУ характерен для источников бытовых пирогенных эмиссий [17, 32].

В пробах Gub3-5, отобранных рядом с автодорогами Сургут–Салехард и Муравленко–Губкинский и находящихся на больших расстояниях (26–50 км) от месторождения Губкинское, снижается доля бенз(ghi)перилена и повышается доля бенз(b) флуорантена (рис. 2*б*). Доминирование фенантрена в твердой фазе транспортных выхлопов характерно для бензиновых и дизельных двигателей [18]. Высокое содержание фенантрена и флуорантена, а также преобладание среди ВМ ПАУ бенз(b)флуорантена типично для выхлопов автомобильного транспорта и выбросов мазутных котельных [16]. Подобный профиль ПАУ определен на расстояниях порядка 100 км от Ярудейского (Ndm3) и Ново-Уренгойского месторождений (Phet2), где кроме дальнего переноса влияют эмиссии близкорасположенных поселков, что выражается в повышенном вкладе в состав ПАУ таких соединений, как флуорантен и пирен (рис. 2*в*). В горо-

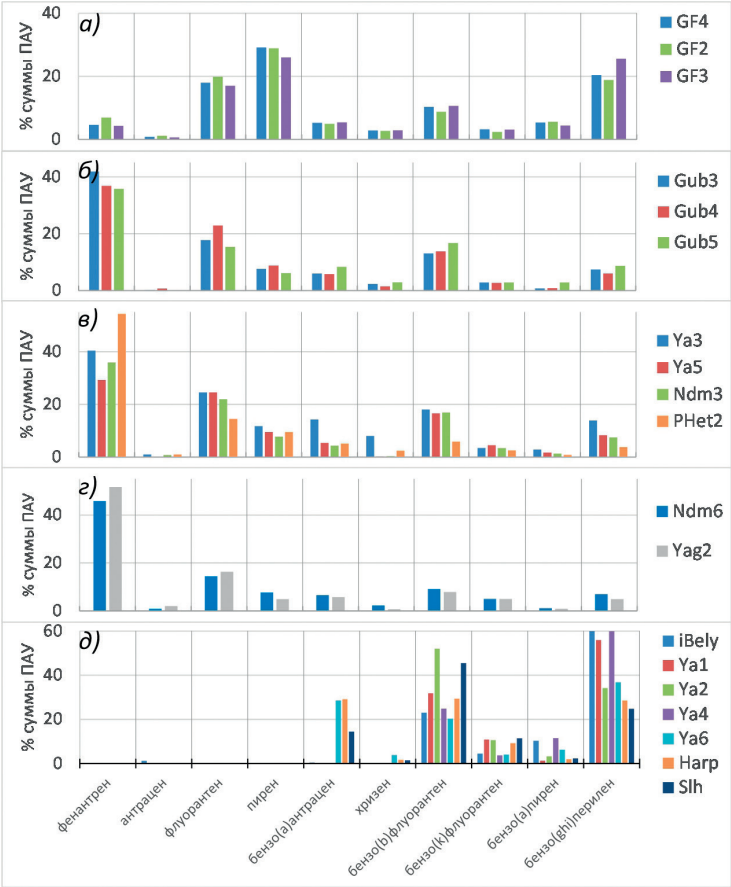

Рис. 2. Состав ПАУ твердой фракции снежного покрова.

а) — в зоне интенсивного действия факелов сжигания газа; *б)* — рядом с автодорогами Сургут–Салехард и Муравленко–Губкинский; *в)* — около населенных пунктов Надым, Правохеттинский, Сабетта, Бованенково; *г)* — около компрессорной станции и полигона ТКО; *д)* — на о. Белый, полуострове Ямал и на территории Обской губы

Fig. 2. PAH profiles of the snowpack solid fraction.

а) in the region of gas flare impact; *б*) near Surgut-Salekhard and Muravlenko-Gubkinsky highways; *в*) near Nadym, Pravokhetinsky, Sabetta, Bovanenkovo settlements, *г*) near a compressor station and solid waste landfill, and *д*) on Bely island, Yamal Peninsula and Ob Bay territory

дах одним из основных источников полиаренов является транспорт, но его влияние диагностируется слабее из-за наличия значительного количества городских эмиссий, включая отопительные системы различной крупности. Для городских территорий характерна высокая неоднородность накопления загрязнений в снеге, подобно полученным для пробы Ndm3, отобранной в г. Надым (рис. 2*в*), где на состав ПАУ влияет наличие множественных смешанных источников загрязнения. Высокое содержание фенантрена может определяться не только транспортной активностью, но и работой дизельных генераторов и сжиганием бытовых отходов [33].

Появление в составе ПАУ высоких концентраций фенантрена и антрацена характерно для мест отбора проб Ya3 и Ya5 рядом с недавно освоенным Южно-Тай-

бейским газовым и Бованенковским газоконденсатным месторождениями (рис. 2*в*). Эти пробы характеризуются увеличенной индустриальной нагрузкой на фоне общего низкого уровня загрязнения снежного покрова района и близостью населенных пунктов. Рядом с компрессорной станцией Ndm6 и полигоном ТКО Yag2 получено наиболее заметное преобладание фенантрена — до 50 % от суммы ПАУ (рис. 2*г*).

В зоне с низким уровнем техногенной нагрузки характерно практически полное отсутствие 3- и 4-ядерных ПАУ (рис. 2*д*). Содержание высокомолекулярных ПАУ в местах отбора проб на острове Белый и на полуострове Ямал (кроме Ya3 и Ya5)

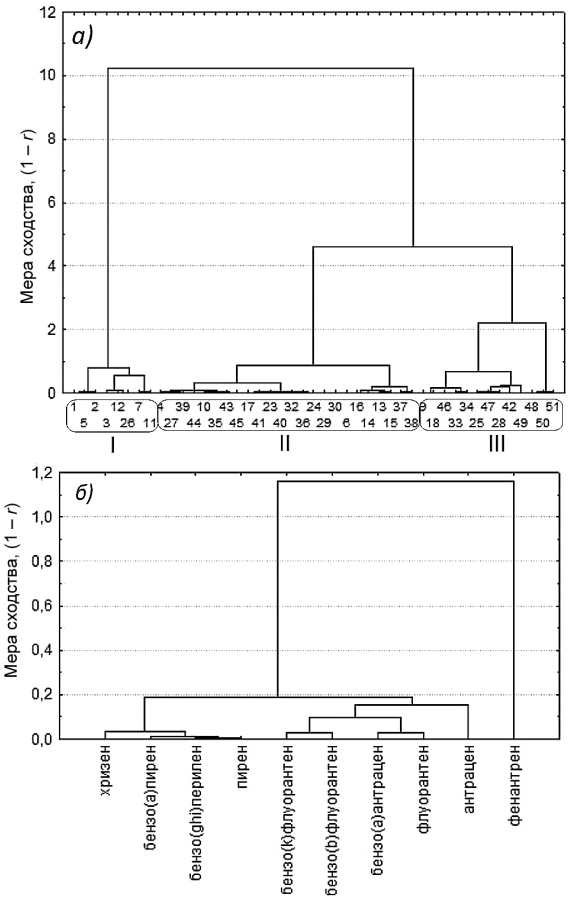

Рис. 3. Группировки ПАУ по результатам кластерного анализа индивидуальных соединений, мера сходства корреляционного анализа (1 – *r*) с кластеризацией *а*) состава ПАУ по местам пробоотбора и *б*) индивидуальных ПАУ. Классификация мест пробоотбора: I — удаленные от источников, II — находящиеся под влиянием многих источников техногенных эмиссий, III — под влиянием факельных эмиссий. Цифры на оси x означают номера мест отбора, указанных в табл. 1

Fig. 3. PAH grouping based on cluster analysis, linkage distance of cluster analysis based on *a*) PAH composition in snow sampling sites, I — remote from sources, II) mixed impact of numerous technogenic emissions, and III) under gas flaring emissions (the numbers on the axis x denote sites of sampling indicated in Tabl.1, and *б*) individual PAHs.

составляет 70–100 % преимущественно за счет вклада бенз(b)флуорантена и бенз(ghi) перилена. Общими признаками для этих мест является удаленность от источников интенсивных эмиссий хозяйственной деятельности центрального района ЯНАО и объектов ТЭК. Высокое содержание бенз(ghi)перилена в снеге для территорий, отдаленных от техногенных источников полиаренов, отмечено в работах [34, 35]. 4-ядерные ПАУ бенз(a)антрацен и хризен присутствуют в пробах Harp и Slh, расположенных ближе к индустриальным территориям Обской губы (рис. 2*д*).

Характерные особенности ПАУ в твердой фракции снежного покрова определяются результатами кластерного анализа (рис. 3). По составу ПАУ все места отбора объединяются в три кластера: в первом (I) группируются отобранные в удаленных малонаселенных районах, второй (II) включает места, находящиеся под влиянием смешанных пирогенных эмиссий антропогенного генезиса, источниками которых могут являться сжигание угля и мазута в котлах мелких и крупных отопительных систем, выхлопы автотранспорта, выбросы работающих генераторов и компрессорных станций, сжигание древесины и бытового мусора в жилом секторе (рис. 3*а*). Остальные места отбора представляют третий (III) кластер наиболее заметного влияния факельных эмиссий в районах высокой техногенной нагрузки, расположенных южнее и восточнее Ямальского полуострова и реки Оби, где наблюдается более высокая плотность объектов ТЭК (см. рис. 1).

При проведении анализа по индивидуальным ПАУ в кластер объединяются пирен, бенз(ghi)перилен и бенз(a)пирен, концентрации которых в снеге в зоне действия факельных эмиссий максимальны (рис. 3*б*). Бензфлуорантен и флуорантен объединяются в другой кластер, что указывает на их поступление из источников, отличных от выбросов факелов. Наименее связанным с другими ПАУ оказался фенантрен, на концентрацию которого может влиять не только тип источника, но и процессы трансформации.

Показателем значительного влияния эмиссий факельных установок, определяющим группу (1), является доминирование 4-ядерных при относительно невысоком содержании 3-ядерных полиаренов (рис. 4). При ослаблении факельных эмиссий по мере удаления от объектов ТЭК наблюдается изменение относительного содержания суммы ПАУ. Для группы (2) с заметным влиянием факельных эмиссий в составе ПАУ наблюдается высокая доля 4-ядерных соединений. К этой группе относятся пробы, отобранные на расстоянии 1–12 км от Ново-Уренгойского, Западно-Таркосалинского, Средне-Хулымского и Аркатойского газоконденсатных месторождений. На загрязненность проб Ya3 и Ya5 на полуострове Ямал влияют эмиссии Бованенковского и Южно-Тамбейского месторождений. Для группы (3) определяется слабое влияние факельных эмиссий объектов ТЭК, при этом в накоплении ПАУ играет роль дальний перенос, что выражается в снижении доли 4-ядерных полиаренов по сравнению с 5, 6-ядерными. Среди проб этой же группы находятся Taz1 и Taz2, отобранные на расстоянии 41 км от месторождения Заполярное. Места отбора группы (4), отнесенные к зоне влияния смешанных антропогенных эмиссий, объединяет доминирование в твердых выпадениях 3-ядерных ПАУ. Для слабого техногенного воздействия преимущественно в удаленных арктических регионах для группы (5) характерна высокая, вплоть до 100 %, доля высокомолекулярных 5, 6-ядерных ПАУ. Таким образом, суммарное содержание и состав ПАУ в твердой фракции снежных проб двухлетнего отбора, проведенного на различных расстояниях от объектов нефтегазодобывающего комплекса, у автодорог, вблизи населенных пунктах и в удаленных арктических районах, отражают геопространственное распределение техногенных эмиссий.

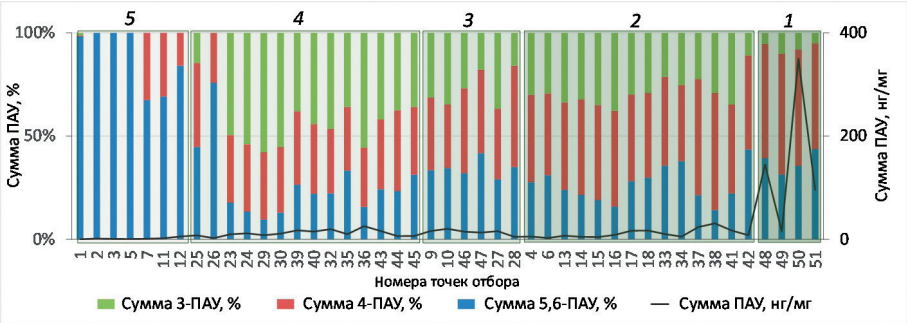

Рис. 4. Вклад суммы 3-, 4- и 5-, 6-ядерных ПАУ в их суммарное содержание: 1) влияние факельных выбросов; 2) заметное влияние факельных выбросов; 3) слабое влияние факельных выбросов; 4) влияние смешанных эмиссий и 5) слабое техногенное воздействие. Кривой отмечена сумма ПАУ (нг/мг) твердой фракции снега

Fig. 4. Percentage contribution of the sum of 3, 4 and 5, 6-nucleus PAHs to the total content of PAHs in snow sampled at sites 1) near gas flares; under 2) a noticeable impact of gas flare emissions and 3) weak impact of flare emissions as well as under 4) mixed source impact and 5) weak technogenic impact. The line presents the sum of PAHs

Индикаторные показатели ПАУ

Проведенный поиск количественных закономерностей и взаимосвязей между концентрациями индивидуальных ПАУ дает возможность определить индикаторные показатели. В расчетах индикаторных показателей ПАУ используют разные соотношения НМ и ВМ ПАУ и для полиаренов с разным числом колец [9, 10, 16, 19]. Среди НМ ПАУ отношение концентраций 4-ядерных флуорантен к пирену является более чувствительным индикатором источника поступления полиаренов в индустриальных районах по сравнению с отношением 3-ядерных изомеров фенантрена к антрацену, так как пара флуорантен и пирен более стабильна в широком диапазоне концентраций в аэрозольных эмиссиях различных источников [17]. Величины индексов для пирогенных источников определяются типом сжигаемого топлива [19]. Так, отношение бенз(а)пирена к бенз(g,h,i)перилену ниже 0,6 указывает на выбросы автотранспорта, а выше 0,6 — на стационарные источники [19].

Поскольку в профиле состава ПАУ снежного покрова под влиянием факельных эмиссий доминируют пирен и бенз(ghi)перилен, они используются в качестве соединений, определяющих характерные для данного источника соотношения НМ и ВМ ПАУ. Для определения индикаторных показателей, которые наилучшим образом описывают изменения состава ПАУ в твердой фракции снега при снижении вклада факельных эмиссий, рассчитывали отношения разных ВМ ПАУ. Наилучшая корреляция была получена для бинарных индикаторных показателей: отношения флуорантена к пирену и бенз(b)флуорантена к бенз(ghi)перилену. Были выделены группы, для которых состав полиаренов определяется степенью влияния источника факельного сжигания (рис. 5). Оба индикаторных соотношения имеют низкие значения ~ 0,6 вблизи факельных установок объектов ТЭК (группа 1). При ослаблении влияния факельных эмиссий (группа 2) и увеличении расстояния до месторождения и объектов ТЭК отношение флуорантена к пирену повышается до значений порядка 1 за счет вклада других пирогенных источников поступления ПАУ. Одновременно для высокомолекулярных ПАУ в составе снега снижается доля бенз(ghi)периле-

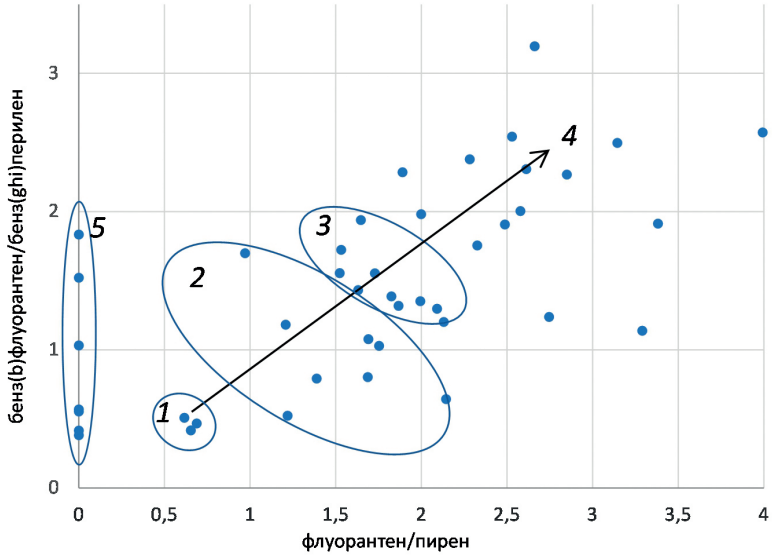

Рис. 5. Индикаторные показатели ПАУ в пробах твердой фракции снега, отобранных в местах: 1) влияния факельных выбросов; 2) заметного влияния факельных выбросов; 3) слабого влияния факельных выбросов; 4) смешанного воздействия и 5) слабого техногенного воздействия. Стрелкой показано изменение индикаторных показателей при снижении вклада факельных эмиссий

Fig. 5. Diagnostic indicators of PAHs in snow showing 1) the impact of gas flaring; 2) noticeable impact of gas flaring; 3) weak impact of gas flaring; 4) mixed source impact, and 5) weak technogenic impact. The arrow shows the indicator change with a decrease in flare emissions contribution

на, а отношение бенз(b)флуорантена к бенз(ghi)перилену повышается. В местах, отнесенных к области влияния смешанных эмиссий (группа 4), величины обоих индикаторных соотношений превышают 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для центральных районов ЯНАО содержание и состав ПАУ в твердой фракции снежного покрова определяются наличием загрязнения, сформированного действием источников техногенных эмиссий, в том числе эмиссий факельного сжигания попутного газа. Высокая плотность источников приводит к накоплению преимущественно низкомолекулярных ПАУ. Влияние выбросов факельных установок отличается от других типов эмиссий преобладанием пирена, бенз(ghi)перилена и бенз(a)пирена, суммарное содержание ПАУ в твердой фракции снега вблизи источника увеличивается до 350 нг/мг. Отношения флуорантена к пирену и бенз(b)флуорантена к бенз(ghi) перилену при значениях 0,6 идентифицируют влияние эмиссий факельных установок сжигания попутного газа. По мере удаления от объектов ТЭК и приближения к автодорогам и населенным пунктам повышается доля бенз(b)флуорантена, фенантрена и флуорантена. При ослаблении влияния факельных эмиссий наблюдается изменение относительного содержания суммы ПАУ, снижается доля 4-ядерных полиаренов по сравнению с 5-, 6-ядерными. Отношение флуорантена к пирену и бенз(b)флуорантена к бенз(ghi)перилену в местах влияния смешанных эмиссий превышает 2. Снежный покров удаленных арктических районов находится под воздействием переноса техногенных эмиссий. Состав ПАУ на территории полуострова Ямал и острове Белый

характеризуется низким, не более 2 нг/мг, суммарным содержанием ПАУ, профиль которого представлен высокомолекулярными 5–6-ядерными полиаренами. Появление в составе твердой фракции снега 3-, 4-ядерных ПАУ в районах освоения новых месторождений зоны указывает на повышенный уровень техногенной нагрузки. Полученные результаты могут быть использованы в качестве значимых показателей возрастающего влияния развивающихся объектов ТЭК на экологию арктической части Западной Сибири.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-05-60-084, а также в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

Funding. The work was carried out with the financial support of RFFI in the framework of project No. 18-05-60-084. The study was carried out as part of the Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Moscow State University “The Future of the Planet and Global Environmental Changes”.

Благодарности. Авторы выражают благодарность канд. геол.-минерал. наук А.Н. Новигатскому (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН) за обучение методике отбора проб.

Acknowledgments. The authors thank A.N. Novigatsky (P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences) for providing a method for snow cover sampling.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доклад об экологической ситуации в Ямало-Ненецком автономном округе в 2019 году. URL: https://dprr.yanao.ru/documents/active/74512/ (дата обращения 30.01.2021).

2. *Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г.* Оценка экологического состояния природной среды районов добычи нефти и газа в ЯНАО // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2012. № 4. С. 86–100.

3. *Кобелев В.О., Поповичева О.Б., Шинкарук Е.В., Агбалян Е.В., Колесников Р.А., Новигатский А.Н.* Кислотность атмосферных осадков зимнего периода на территории районов Ямало-Ненецкого автономного округа с различной антропогенной нагрузкой // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2019. № 1 (102). С. 81–88.

4. *Pozhitkov R., Moskovchenko D., Soromotin A., Kudryavtsev A., Tomilova E.* Trace elements composition of surface snow in the polar zone of northwestern Siberia: the impact of urban and industrial emissions // Environmental Monitoring and Assessment. 2020. V. 192. P. 215–229. doi: 10.1007/s10661-020-8179-4

5. *Ravindra K., Mittal A.K., Van Grieken R.* Health risk assessment of urban suspended particulate matter with special reference to polycyclic aromatic hydrocarbons: a review // Reviews on Environmental Health. 2001. V. 16. P. 169–189. doi: 10.1515/REVEH.2001.16.3.169

6. *Baek S.O., Field R.A., Goldstone M.E., Kirk P.W., Lester J.N., Perry R.* A review of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Sources, fate and behavior // Water, Air and Soil Pollution. 1991. V. 60. P. 279–300. doi:10.1007/BF00282628

7. *Kokovkin V.V., Raputa V.F., Morozov S.V., Yaroslavtseva T.V.* Polyaromatic hydrocarbons in the vicinity of the major highways of Novosibirsk // Химия в интересах устойчивого развития. 2016. № 24. P. 491–497. doi: 10.15372/KhUR20160409

8. *Raputa V.F., Kokovkin V.V., Morozov S.V., Yaroslavtseva T.V.* Organic carbon in the city territories of the south of West Siberia // Химия в интересах устойчивого развития. 2016. Т. 24. С. 483–489.

9. *Жидкин А.П., Геннадиев А.Н., Лобанов А.А.* Индикационное значение соотношений полициклических ароматических углеводородов в системе снег-почва при разных условиях землепользования // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2017. № 5. С. 24–31.

10. *Gennadiev A.N., Zhidkin A.P., Koshovskii T.S.* Factors and trends in the formation of natural–technogenic associations of polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow–soil system // Doklady Earth Sciences. 2020. V. 490. P. 36–39. doi:10.1134/S1028334X20010031

11. *Dat N.-D., Chang M.B*. Review on characteristics of PAHs in atmosphere, anthropogenic sources and control technologies // Science of the Total Environment. 2017. V. 609. P. 682–693. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.204

12. *Gouin T., Wilkinson D., Hummel S., Meyer B., Culley A.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in air and snow from Fairbanks, Alaska // Atmospheric Pollution Research. 2010. V. 1. P. 9–15. doi: 10.5094/APR.2010.002

13. *Barbante C., Spolaor A., Cairns W.R., Boutron C.* Man's footprint on the Arctic environment as revealed by analysis of ice and snow // Earth Sci. Rev. 2017. № 168. P. 218–231. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.02.010.

14. *Abramova A., Chernianskii S., Marchenko N., Terskaya E.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in snow particulates around Longyearbyen and Barentsburg settlements, Spitsbergen // Polar Rec. (Gr. Brit). 2016. V. 52. P. 645–659. https://doi.org/10.1017/S0032247416000243.

15. *Nemirovskaya I.A., Shevchenko V.P.* Organic compounds and suspended particulate matter in snow of high latitude areas (Arctic and Antarctic) // Atmosphere. 2020. V. 11. № 9. P. 928. doi: 10.3390/atmos11090928

16. *Semenov M.Yu., Marinaite I.I.* Using the end-member mixing approach to apportion sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in various environmental compartments // Environmental Earth Sciences. 2016. V. 75. № 3. P. 207–218. doi: 10.1007/s12665-015-4969-3

17. *Stogiannidis E., Laane R.* Source characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons by using their molecular indices: An overview of possibilities // Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. 2015. V. 234. P. 49–133. doi: 10.1007/978-3-319-10638-0_2

18. *Khalili N.R., Schefft P.A., Holsen T.M.* PAH source fingerprints for coke ovens, diesel and gasoline engines, highway tunnels, and wood combustion emissions // Atmospheric Environment. 1995. V. 29. P. 533–542. doi: 10.1016/1352-2310(94)00275-P

19. *Tobiszewski M., Namiesnik J.* PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources // Environmental Pollution. 2012. V. 162. P. 110–119. doi: 10.1016/j.envpol.2011.10.025

20. Глобальное партнерство Всемирного банка по сокращению сжигания газа в факелах (GGFR). URL: https://www.worldbank.org/en/programs/gasflaringreduction#7 (дата обращения 20.09.2021).

21. *Huang K., Fu J., Prikhodko V., Storey J., Romanov A., Hodson E., Cresko J.,Morozova I., Ignatieva Y., Cabaniss J.* Russian anthropogenic black carbon: Emission reconstruction and Arctic black carbon simulation // J. Geophys. Research. 2015. V. 120. P. 11306–11333. doi: 10.1002/2015JD023358

22. *Ященко Н.Г., Сваровская Л.И., Алексеева М.Н.* Оценка экологического риска сжигания попутного нефтяного газа в Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 6. С. 560–566.

23. *Popovicheva O., Timofeev M., Persiantseva N., Jefferson M.A., Johnson M., Rogak S.N., Baldelli A.* Microstructure and chemical composition of particles from small-scale gas flaring // Aerosol and Air Quality Research. 2019. V. 19. № 10. P. 2205–2221. doi: 10.4209/aaqr.2019.04.0177

24. *Panyma В.Ф.* Экспериментальные и численные исследования аэрозольных выпадений примесей в окрестности нефтегазового факела // Вестник НГУ. Сер.: Математика, механика, информатика. 2013. Т. 13. № 3. С. 96–102.

25. *Manousakas M., Popovicheva O., Evangeliou N., Diapouli E., Sitnikov N., Shonija N., Eleftheriadis K.* Aerosol carbonaceous, elemental and ionic composition variability and origin at the Siberian High Arctic, Cape Baranova // Tellus. Series B: Chemical and Physical Meteorology. 2020. V. 72. P. 1–14. doi.org/10.1080/16000889.2020.1803708

26. *Schroeder W., Oliva P., Giglio L., Csiszar I.A.* The New VIIRS 375 m active fire detection data product: algorithm description and initial assessment // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 143. P. 85–96. doi: 10.1016/j.rse.2013.12.008

27. *Новигатский А.Н., Лисицын А.П.* Концентрация, состав и потоки рассеянного осадочного вещества в снежно-ледовом покрове околополюсного района Арктики // Океанология. 2019. Т. 59. № 3. С. 449–453.

28. *Jaffe D., Cerundolo B., Rickers J., Stolzberg R., Baklanov A*. Deposition of sulfate and heavy metals on the Kola Peninsula // Science of the Total Environment. 1995. V. 160–161. P. 127–134. https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04350-A.

29. *Zdanowicz C., Zheng J., Klimenko E., Outridge P.M.* Mercury and other trace metals in the seasonal snowpack across the subarctic taiga-tundra ecotone, Northwest Territories, Canada // Applied Geochemistry. 2017. V. 82. P. 63–78. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.04.011.

30. *Pomeroy J.W., Davies T.D., Jones H.G., Marsh P., Peters N.E., Tranter M*. Transformations of snow chemistry in the boreal forest: Accumulation and volatilization // Hydrological Processes. 1999. V. 13. № 14–15. P. 2257–2273.

31. *Zavgorodnyaya Yu.A., Chikidova A.L., Biryukov M.V., Demin V.V.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric particulate depositions and urban soils of Moscow, Russia // Journal of Soils and Sediments. 2019. V. 19. P. 3155–3165. doi: 10.1007/s11368-018-2067-3

32. *Василевич М.И., Безносиков В.А., Габов Д.Н.* Полициклические ароматические углеводороды в снеговом покрове фоновых территорий таежной зоны европейского северо-востока России. // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2014. № 4. С. 337–343.

33. *Hsu W.T., Liu M.C., Hung P.C., Chang S.H., Chang M.B.* PAH emissions from coal combustion and waste incineration // Journal of Hazardous Materials. 2016. V. 318. P. 32–40. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.06.038

34. *Zhidkin A.P., Gennadiev A.N., Koshovskii T.S.* Input and behavior of polycyclic aromatic hydrocarbons in arable, fallow, and forest soils of the taiga zone (Tver Oblast) // Eurasian Soil Science. 2017. V. 50. № 3. P. 296–304. doi: 10.1134/S1064229317030139

35. *Gennadiev A.N., Zhidkin A.P., Koshovskii T.S.* Factors and trends in the formation of natural–technogenic associations of polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow–soil system // Doklady Earth Sciences. 2020. V. 490. P. 36–39. doi: 10.1134/S1028334X20010031

REFERENCES

1. *Doklad ob ekologicheskoi situatsii v Iamalo-Nenetskom avtonomnom okruge v 2019 godu.* Report on the environmental situation in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug in 2019. Available at: https://dprr.yanao.ru/documents/active/74512/ (accessed 30.01.2021).

2. *Opekunov A.J., Opekunova M.G., Kukushkin S.U., Ganul A.G*. Assessment of the ecological state of the natural environment of oil and gas production areas in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. *Vestnik SPbGU*. Bulletin of St. Petersburg State University. 2012, 7 (4): 86–100. [In Russian].

3. *Kobelev V.O., Popovitcheva O.B., Shinkaruk E.V., Bagbaljan E.V., Kolesnikov R.A., Novigatskij A.N.* Acidity of atmospheric precipitation of the winter period in the areas of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug with various anthropogenic loads. *Nauchnyy vestnik Jamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga.* Scientific bulletin of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. 2019, 1 (102): 81–88. [In Russian].

4. *Pozhitkov R., Moskovchenko D., Soromotin A., Kudryavtsev A., Tomilova E.* Trace elements composition of surface snow in the polar zone of northwestern Siberia: the impact of urban and

industrial emissions. Environmental Monitoring and Assessment. 2020, 192: 215–229. doi: 10.1007/s10661-020-8179-4

5. *Ravindra K., Mittal A.K., Van Grieken R.* Health risk assessment of urban suspended particulate matter with special reference to polycyclic aromatic hydrocarbons: a review. Reviews on Environmental Health. 2001, 16: 169–189. doi: 10.1515/REVEH.2001.16.3.169

6. *Baek S.O., Field R.A., Goldstone M.E., Kirk P.W., Lester J.N., Perry R.* A review of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Sources, fate and behavior. Water, Air and Soil Pollution. 1991, 60: 279–300. doi: 10.1007/BF00282628

7. *Kokovkin V.V., Raputa V.F., Morozov S.V., Yaroslavtseva T.V.* Polyaromatic Hydrocarbons in the Vicinity of the Major Highways of Novosibirsk. *Himia v interesah ustojchivogo razvitija*. Chemistry for sustainable development. 2016, 24: 491–497. doi: 10.15372/KhUR20160409. [In Russian].

8. *Raputa V.F., Kokovkin V.V., Morozov S.V., Yaroslavtseva T.V.* Organic carbon in the city territories of the south of West Siberia. *Himia v interesah ustojchivogo razvitija*. Chemistry for sustainable development. 2016, 24: 483–489. doi: 10.15372/KhUR20160408. [In Russian].

9. *Zhidkin A.P., Gennadiev A.N., Lobanov A.A.* Indication value of ratios of polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow-soil system under different land use conditions. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: Geografija.* Bulletin of Moscow University. Series Geography. 2017, 5: 24–31. [In Russian].

10. *Gennadiev A.N., Zhidkin A.P., Koshovskii T.S.* Factors and trends in the formation of natural–technogenic associations of polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow–soil system. Doklady Earth Sciences. 2020, 490: 36–39. doi: 10.1134/S1028334X20010031

11. *Dat N.-D., Chang M.B.* Review on characteristics of PAHs in atmosphere, anthropogenic sources and control technologies. Science of the Total Environment. 2017, 609: 682–693. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.204

12. *Gouin T., Wilkinson D., Hummel S., Meyer B., Culley A.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in air and snow from Fairbanks, Alaska. Atmospheric Pollution Research. 2010, 1: 9–15. doi: 10.5094/APR.2010.002

13. *Barbante C., Spolaor A., Cairns W.R., Boutron C.* Man's footprint on the Arctic environment as revealed by analysis of ice and snow. Earth Sci. Rev. 2017, 168: 218–231. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.02.010.

14. *Abramova A., Chernianskii S., Marchenko N., Terskaya E.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in snow particulates around Longyearbyen and Barentsburg settlements, Spitsbergen. Polar Rec. (Gr. Brit). 2016, 52: 645–659. https://doi.org/10.1017/S0032247416000243.

15. *Nemirovskaya I.A., Shevchenko V.P.* Organic compounds and suspended particulate matter in snow of High Latitude Areas (Arctic and Antarctic). Atmosphere. 2020, 11 (9): 928. doi: 10.3390/atmos11090928

16. *Semenov M.Yu., Marinaite I.I.* Using the end-member mixing approach to apportion sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in various environmental compartments. Environmental Earth Sciences. 2016, 75 (3): 207–218. doi: 10.1007/s12665-015-4969-3

17. *Stogiannidis E., Laane R.* Source characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons by using their molecular indices: An overview of possibilities. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. 2015, 234: 49–133. doi: 10.1007/978-3-319-10638-0_2

18. *Khalili N.R., Schefft P.A., Holsen T.M.* PAH source fingerprints for coke ovens, diesel and gasoline engines, highway tunnels, and wood combustion emissions. Atmospheric Environment. 1995, 29: 533–542. doi: 10.1016/1352-2310(94)00275-P

19. *Tobiszewski M., Namiesnik J.* PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources. Environmental Pollution. 2012, 162: 110–119. doi: 10.1016/j.envpol.2011.10.025

20. Global Gas Flaring Reduction Partnership (GGFR). Available at: https://www.worldbank.org/en/programs/gasflaringreduction#7 (accessed 20.09.2021).

21. *Huang K., Fu J., Prikhodko V., Storey J., Romanov A., Hodson E., Cresko J.,Morozova I., Ignatieva Y., Cabaniss J.* Russian anthropogenic black carbon: Emission reconstruction and Arctic black carbon simulation. J. Geophys. Research. 2015, 120: 11306–11333. doi: 10.1002/2015JD023358

22. *Jazshenko N.G., Svarovskaja L.I., Alekseeva M.N.* Environmental risk assessment of associated petroleum gas combustion in Western Siberia. *Optika atmosfery i okeana*. Atmospheric and ocean optics. 2014, 27 (6): 560–566. [In Russian].

23. *Popovicheva O., Timofeev M., Persiantseva N., Jefferson M.A., Johnson M., Rogak S.N., Baldelli A.* Microstructure and chemical composition of particles from small-scale gas flaring. Aerosol and Air Quality Research. 2019, 19 (10): 22050–2221. doi: 10.4209/aaqr.2019.04.0177

24. *Raputa V.F.* Experimental and numerical studies of aerosol impurities in the vicinity of the oil and gas flare. *Vestnik NGU. Ser. Matematika, mehanika, informatika*. Bulletin of NSU. Series: Mathematics, Mechanics, Computer Science. 2013, 13 (3): 96–102. [In Russian].

25. *Manousakas M., Popovicheva O., Evangeliou N., Diapouli E., Sitnikov N., Shonija N., Eleftheriadis K.* Aerosol carbonaceous, elemental and ionic composition variability and origin at the Siberian High Arctic, Cape Baranova. Tellus. Series B: Chemical and Physical Meteorology. 2020, 72: 1–14. doi.org/10.1080/16000889.2020.1803708

26. *Schroeder W., Oliva P., Giglio L., Csiszar I.A.* The New VIIRS 375 m active fire detection data product: algorithm description and initial assessment. Remote Sensing of Environment. 2014, 143: 85–96. doi: 10.1016/j.rse.2013.12.008

27. *Novigatsky A.N., Lisitzin A.P.* Concentration, composition, and fluxes of dispersed sedimentary material in the snow and ice cover of the Polar Arctic. Oceanology. 2019, 59 (3): 406–410. https://doi.org/10.1134/S0001437019030159

28. *Jaffe D., Cerundolo B., Rickers J., Stolzberg R., Baklanov A*. Deposition of sulfate and heavy metals on the Kola Peninsula. Science of The Total Environment. 1995, 160–161: 127–134. https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04350-A.

29. *Zdanowicz C., Zheng J., Klimenko E., Outridge P.M.* Mercury and other trace metals in the seasonal snowpack across the subarctic taiga-tundra ecotone, Northwest Territories, Canada. Applied Geochemistry. 2017, 82: P. 63–78. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.04.011.

30. *Pomeroy J.W., Davies T.D., Jones H.G., Marsh P., Peters N.E., Tranter M.* Transformations of snow chemistry in the boreal forest: Accumulation and volatilization. Hydrological Processes. 1999, 13 (14–15): 2257–2273.

31. *Zavgorodnyaya Yu.A., Chikidova A.L., Biryukov M.V., Demin V.V.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric particulate depositions and urban soils of Moscow, Russia. Journal of Soils and Sediments. 2019, 19: 3155–3165. doi: 10.1007/s11368-018-2067-3

32. *Vasilevich M.I., Beznosikov B.A., Gabov D.H.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow cover of the background areas of the taiga zone of the European northeast of Russia. Geoekologia. Inzhenernaya geologiya. Gidrologiya. Geokriologiya. Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology. 2014, 4: 337–343. [In Russian].

33. *Hsu W.T., Liu M.C., Hung P.C., Chang S.H., Chang M.B*. PAH emissions from coal combustion and waste incineration. Journal of Hazardous Materials. 2016, 318: 32–40. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.06.038

34. *Zhidkin A.P., Gennadiev A.N., Koshovskii T.S.* Input and behavior of polycyclic aromatic hydrocarbons in arable, fallow, and forest soils of the taiga zone (Tver Oblast). Eurasian Soil Science. 2017, 50 (3): 296–304. doi: 10.1134/S1064229317030139

35. *Gennadiev A.N., Zhidkin A.P., Koshovskii T.S.* Factors and trends in the formation of natural–technogenic associations of polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow–soil system. Doklady Earth Sciences. 2020, 490: 36–39. doi: 10.1134/S1028334X20010031