

УДК 504.054:547.62

Распределение полициклических ароматических углеводородов в природных объектах на территории рассеивания выбросов Иркутского алюминиевого завода (г. Шелехов, Иркутская обл.)

И. И. МАРИНАЙТЕ¹, А. Г. ГОРШКОВ¹, Е. Н. ТАРАНЕНКО², Е. В. ЧИПАНИНА¹, Т. В. ХОДЖЕР¹¹Лимнологический институт Сибирского отделения РАН,
ул. Улан-Баторская, 3, а/я 278, Иркутск 664033 (Россия)

E-mail: marin@lin.irk.ru

²Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения РАН,
ул. Лермонтова, 132, Иркутск 665033 (Россия)

(Поступила 24.07.12; после доработки 06.02.13)

Аннотация

Определены уровни накопления полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в природных объектах на территории рассеивания выбросов Иркутского алюминиевого завода “ИрАЗ-СУАЛ”: в снежном покрове, почве, хвое сосны (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницы (*Larix sibirica*), в воде и донных отложениях р. Олхи, – а также приземном аэрозоле в г. Шелехов. Выполнена оценка степени загрязнения района г. Шелехов соединениями ПАУ в рамках ПДК и фоновых уровней, сделан вывод о распространении ПАУ от источника эмиссии на ограниченной территории. В составе выделенных фракций ПАУ методом хромато-масс-спектрометрии идентифицировано и определено 14 аренов, в том числе включенных в список приоритетных органических загрязнителей.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды, снежный покров, почва, хвоя сосны и лиственницы, вода и донные отложения, городской аэрозоль

ВВЕДЕНИЕ

По данным министерства природных ресурсов Иркутской области, уровень загрязнения атмосферного воздуха в городах Братск, Зима, Иркутск, Ангарск, Саянск, Усолье-Сибирское, Усть-Илимск, Черемхово, Шелехов оценен как высокий и очень высокий, с превышением ПДК по взвешенным веществам, диоксидам азота, углерода и серы, сероводороду, бенз(а)пирену (БаП), формальдегиду, саже, фториду водорода. Основные источники загрязнения атмосферы – промышленные выбросы, объем которых в 2010 г. составил 575 тыс. т [1]. Ряд веществ в составе промышленных выбросов идентифицированы как стойкие органические загрязнители, способные аккумулироваться в природных объектах в зоне рассеивания за-

грязненных воздушных масс и оказывать негативное воздействие на окружающую среду. В частности, район г. Шелехов отличается экстремальным накоплением полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в снежном покрове, почве и растительности [2–6], многие из которых обладают мутагенными и канцерогенными свойствами. Загрязнение атмосферы в районе г. Шелехов соединениями ПАУ определяется выбросами трех крупных заводов СУАЛ-Холдинга: ОАО “СУАЛ” филиал “ИрАЗ-СУАЛ”, ЗАО “Кремний”, ООО “СУАЛ-ПМ”, а также ИТЭЦ-5, причём на долю “ИрАЗ-СУАЛ” приходится 64 % суммарных выбросов от стационарных источников по городу [7]. С 1962 г. на этом заводе производят алюминий в количествах до 412 тыс. т/год. Основная часть мощностей завода

работает по технологии Содерберга с использованием самообжигающихся анодов верхнего токопровода. В 2008 г. была запущена 5-я серия, оборудованная электролизерами с обожженными анодами, что позволило уменьшить выбросы ПАУ в 100–1000 раз [8, 9]. Одновременно с модернизацией оборудования на заводе были внедрены системы оборотного водоснабжения и сухой газоочистки, благодаря чему выбросы фтористых соединений и электролизной пыли снизились на 99 % [8].

Цель настоящего исследования – оценка современных уровней накопления и распределения ПАУ в природных объектах в зоне рассеивания выбросов “ИркАЗ-СУАЛ”, проведенная в рамках проекта “Комплексный эко-

логический аудит Байкальской природной территории и экосистемы озера Байкал – участка мирового природного наследия” (№ 01201052127). Выбранные для исследования объекты – снежный покров, почва, хвоя сосны (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницы (*Larix sibirica*), вода и донные отложения р. Олхи, а также приземный аэрозоль в г. Шелехов – характеризуются различными аккумулирующими свойствами и временными интервалами воздействия на них промышленных выбросов. Их анализ позволит получить комплексную оценку распределения ПАУ в объектах окружающей среды в районе расположения мощного и стационарного источника поллютантов данного класса.

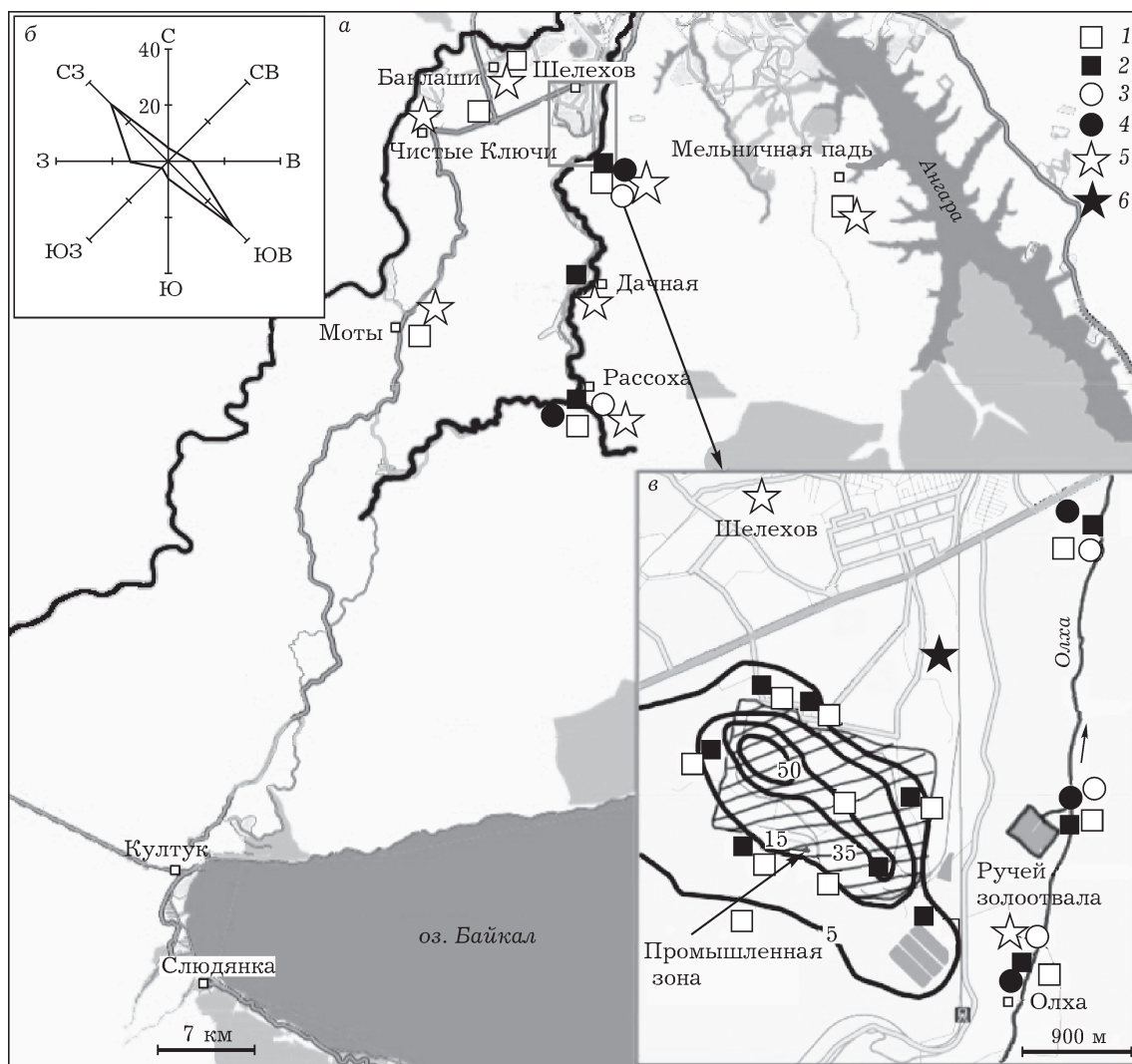


Рис. 1. Схема отбора проб природных объектов (а): 1 – снежный покров, 2 – почва, 3 – вода, 4 – донные осадки, 5 – хвоя сосны и лиственницы; б – повторяемость направлений ветров за год, %; в – распределение уровней накопления суммы ПАУ в снежном покрове в районе рассеивания выбросов “ИркАЗ-СУАЛ” за зимний период 2007–2011 гг. (в мг/м²).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Отбор проб снега, почвы, хвои сосны (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницы (*Larix sibirica*) проводился на 14 станциях в промышленной зоне “ИркАЗ-СУАЛ” и за ее пределами на расстояниях 2, 2.5, 6.5, 11 и 20 км в северном, южном, восточном, западном, юго-восточном и северо-западном направлениях (рис. 1). Пробы снега отбирали на всю глубину снежного покрова в конце февраля – начале марта 2009–2010 гг., пробы поверхностного слоя почвы (~10 см) – в сентябре 2009 г., пробы хвои – в августе 2010 и 2012 гг. При отборе хвои на каждом участке отбирали среднюю пробу с 5–6 деревьев сосны и лиственницы возраста около 40 лет.

Пробы поверхностной воды и донных осадков р. Олхи отобраны в августе 2009 г. на четырех станциях: на удалении от промышленной зоны на 2 и 20 км; в устье дренажного ручья, вытекающего с золоотвала ИТЭЦ-5; на расстоянии 2 км вниз по течению р. Олхи от устья дренажного ручья. Атмосферный аэрозоль отбирали на стекловолокнистые фильтры диаметром 4.7 см (фирма Munktell, Германия) в южной части г. Шелехов на удалении 2.5 км от промышленной зоны в северо-восточном направлении в период с 20 по 26 марта 2009 г. Продолжительность отбора проб составляла 2–24 ч.

Определение ПАУ в аэрозоле, снегу, воде проводили по аттестованным методикам [10–12]. Пробы почв и донных отложений перед проведением анализа высушивали до постоянной массы и гомогенизировали; подготовку для анализа проводили по методике, изложенной в [10]. Измерение ПАУ в аналитическом окончании методик проводили методом хромато-масс-спектрометрии по методике, описанной в работе [13]. Определение ПАУ в хвое проводили согласно методике [13]. Суммарная погрешность определения ПАУ в пробах оценена в 10 % без учета погрешности отбора проб; погрешность оценки соотношения индивидуальных ПАУ – 14 %. Построение распределения уровней накопления суммы ПАУ в снежном покрове в районе рассеивания выбросов “ИркАЗ-СУАЛ” выполнено с использованием программы Serfer (V 6.04).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Загрязнение приземного аэрозоля ПАУ

Промышленная зона “ИркАЗ-СУАЛ” расположена примерно в 1.5 км от ближайших жилых домов г. Шелехов, поэтому выбросы завода, особенно при южных и юго-западных ветрах, служат основными источниками загрязнения атмосферы города. По данным государственных докладов [1, 14], максимальная концентрация БаП в воздухе г. Шелехов в 2010–2011 гг. была зарегистрирована на уровне 6.2–9.2 ПДК (ПДК БаП в окружающем воздухе 1 нг/м³) при средней концентрации в течение года 2.8–3.2 ПДК.

При отборе проб в 1.5 км от промышленной зоны (см. рис. 1) в условиях устойчивой стратификации атмосферы и при полном штиле суммарная концентрация идентифицированных ПАУ (ΣПАУ) достигала 320 нг/м³, а концентрация БаП – 19 ПДК (табл. 1). После прохождения ливневых дождей, которые очистили атмосферу, уровень ΣПАУ снизился до 2.9–14 нг/м³, но качественный состав фракции ПАУ в пробах аэрозоля не изменился. Среди обнаруженных ПАУ идентифицировано 12 соединений, включенных в число приоритетных загрязнителей: фенантрен (ФЕН), антрацен (АНТ), флуорантен (ФЛУ), пирен (ПИР), бенз[а]антрацен (БаА), хризен (ХР), бенз[б]флуорантен (БбФ), бенз[к]флуорантен (БкФ), БаП, индено[g,h,i]пирен (ИНП), бенз[g,h,i]перилен (БП), дибенз[a,h]-антрацен (ДБА), а также бенз[e]пирен (БеП) и перилен (ПЕР).

В период минимального и максимального загрязнения атмосферы в образцах аэрозоля значения диагностических соотношений ПАУ – БаП/БеП, БаА/ХР и АНТ/ХР – варьируют в диапазоне от 0.50 до 0.55, что свидетельствует о локальном источнике аренов [26]. Таким источником, в частности, могут быть выбросы алюминиевого завода, судя по преобладанию БбФ во фракции ПАУ [9], как в образцах аэрозоля, так и в пробах снежного покрова на территории промышленной зоны (рис. 2).

При анализе профилей ПАУ в качестве опорного для выбросов “ИркАЗ-СУАЛ” использован профиль фракции аренов, накопленных в снежном покрове промышленной зоны в течение длительного отрезка време-

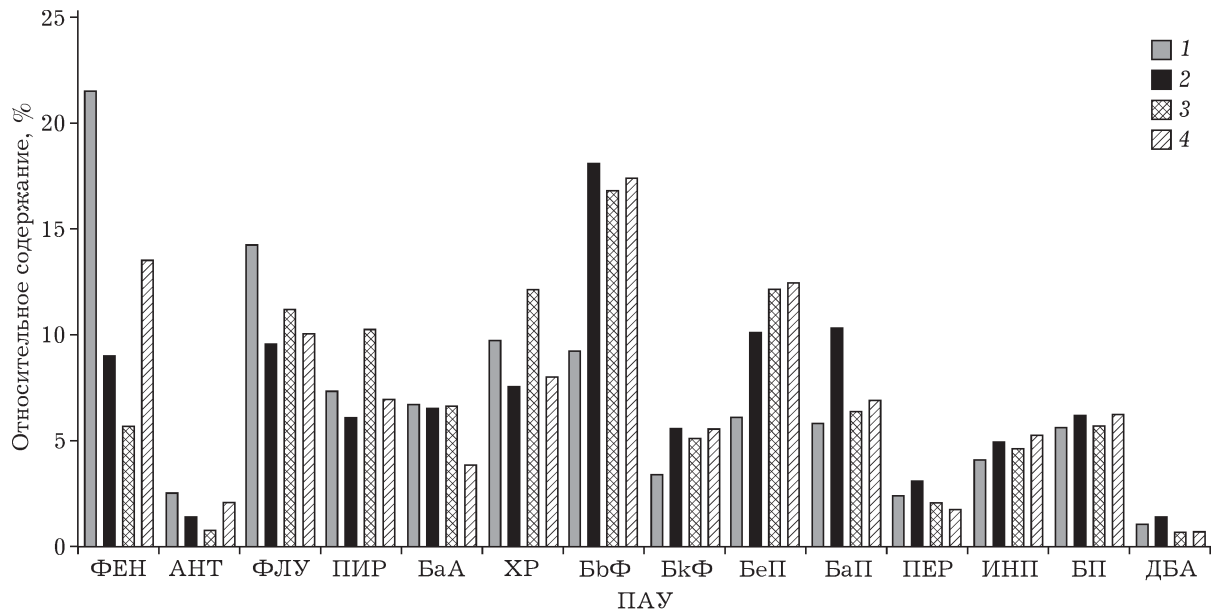


Рис. 2. Относительное содержание ПАУ (в % от ΣПАУ): 1, 2 – в пробах снежного покрова (1 – в центральном районе г. Шелехов, 2 – в промышленной зоне “ИрКАЗ-СУАЛ”); 3, 4 – в аэрозоле в 1.5 км от промышленной зоны (3 – при максимальном уровне загрязнения в 110 нг/м³, 4 – при минимальном уровне загрязнения в 2.9 нг/м³).

ТАБЛИЦА 1

Содержание ПАУ в пробах аэрозоля, отобранных в г. Шелехов, нг/м³

Время отбора проб	ФЕН	АНТ	ФЛУ	ПИР	БаА	ХР	БбФ	БкФ	БеП	БаП	ПЕР	ИНП	БП	ДБА	ΣПАУ	БаП _{ПДК}
<i>Среднесуточное содержание ПАУ (с 20.03 по 26.03.2009 г.)</i>																
21–22.03.09	6.1	0.8	12.0	11.0	7.1	13.0	18.0	5.5	13.0	6.8	2.2	4.9	6.1	0.7	110	6.8
22–23.03.09	2.1	0.3	5.0	4.6	2.4	4.6	6.3	2.1	3.9	3.4	0.7	1.5	1.8	0.3	39	3.4
23–24.03.09	0.4	0.1	0.3	0.2	0.1	0.2	0.5	0.2	0.4	0.2	0.1	0.2	0.2	<0.1	2.9	0.2
24–25.03.09	2.2	0.1	2.7	2.1	0.6	1.5	1.5	0.5	0.9	0.9	0.1	0.3	0.5	<0.1	14	0.9
25–26.03.09	2.2	0.2	2.6	1.3	0.3	1.4	3.6	0.9	2.4	0.8	<0.1	0.7	0.9	0.1	17	0.8
<i>Содержание ПАУ в течение суток (с 14.00 20.03 по 14.00 21.03. 2009 г.)</i>																
20.03.09, 14.00–16.00	4.7	0.5	8.0	5.7	3.8	14.0	41.0	15.0	29.0	17.0	5.6	16.0	20.0	2.9	180	17.0
20.03.09, 16.00–18.00	4.4	0.6	8.6	5.4	3.4	8.6	19.0	7.3	14.0	8.5	2.4	6.0	9.4	1.0	98	8.5
20.03.09, 18.00–21.00	1.4	0.1	0.5	0.4	0.2	0.4	1.3	0.5	1.1	1.0	0.2	0.8	1.4	0.1	9.4	1.0
20.03.09, 21.00–23.00	2.5	0.3	1.0	0.8	0.7	1.0	2.1	0.7	1.6	1.5	0.3	1.0	1.5	0.1	15	1.5
20–21.03.09, 23.00–01.00	3.9	0.5	3.4	2.0	1.9	23.0	16.0	6.0	13.0	9.5	1.9	5.3	8.3	1.2	110	9.5
21.03.09, 01.00–06.00	0.8	0.1	0.5	0.3	0.2	0.3	0.8	0.3	0.6	0.4	0.1	0.6	0.9	0.1	5.9	0.4
21.03.09, 06.00–08.00	1.5	0.1	0.7	0.5	0.3	0.7	1.5	0.5	1.0	0.9	0.2	0.7	0.9	0.1	9.7	0.9
21.03.09, 08.00–12.00	3.7	0.5	2.7	1.9	2.2	7.8	2.1	8.0	1.6	0.7	1.9	8.1	1.2	1.1	44	0.7
21.03.09, 12.00–14.00	18.0	2.7	45.0	39.0	26.0	44.0	50.0	13.0	36.0	19.0	6.7	10.0	11.0	1.4	320	19.0

ни (~100 сут). Использование данных [9, 15] для анализа представлялось недостаточно обоснованным, учитывая применение различных технологий электролиза и, соответственно, наложение выбросов с различным составом и соотношением ПАУ.

Отмечена значительная вариабельность ШПАУ и соотношения индивидуальных аренов в аэрозоле в течение 1 сут. В частности, концентрация БаП варьирует в пределах от 0.4 до 19 ПДК (табл. 1). Изменение уровня ШПАУ в аэрозоле до 30 раз в течение 1 сут сопровождалось изменением соотношений аренов во фракции ПАУ, очевидно, вследствие вклада различных источников в загрязнение атмосферы.

Накопление ПАУ в снежном покрове

В холодное время года в условиях Сибирского антициклона поллютанты выпадают на подстилающую земную поверхность преимущественно в районе их выброса [16]. На этом основании исследование загрязнения снежного покрова позволяет выявить источники, оценить зону рассеивания выбросов и уровень загрязнения атмосферы в течение холодного времени года (в Прибайкалье – до 160 сут). Анализ проб снега, отобранных в районе промышленной зоны “ИрКАЗ-СУАЛ”, свидетель-

ствует о накоплении экстремальных количеств ПАУ на ограниченной площади (около 16 км², см. рис. 1). На расстоянии до 1 км от цеха электролизных ванн ШПАУ в снежном покрове оценена в 50 000 мкг/м². При удалении от промышленной зоны количество ПАУ в пробах снега резко снижалось: на расстоянии 2–2.5 км – от 7 до 20 раз, на расстоянии 20 км – от 200 до 1000 раз (табл. 2). Необходимо отметить, что в районе пос. Моты (20 км в юго-западном направлении от промышленной зоны) накопление ПАУ составило 52 мкг/м² и сопоставимо с уровнем аккумуляции ПАУ в снежном покрове незаселенных участков южного побережья оз. Байкал [4, 17], но почти на порядок превышало фоновый уровень (высокогорная станция фонового мониторинга Монды, 0.5 мкг/м² [6]).

Установлено, что качественный состав фракции ПАУ в пробах снега постоянен (см. табл. 2), но соотношение аренов изменяется по мере удаления точек отбора от промышленной зоны. По-видимому, это связано с уменьшением вклада выбросов алюминиевого завода в загрязнение снега и “проявлением” во фракции ПАУ аренов из других источников. Такими источниками могут быть выбросы ТЭЦ, котельных, домашних печей и автотранспорта, в составе аренов у которых

ТАБЛИЦА 2

Содержание ПАУ в пробах снежного покрова, отобранных в различных районах исследования, мкг/м²

ФЕН	АНТ	ФЛУ	ПИР	БаА	ХР	БьФ	БкФ	БеП	БаП	ПЕР	ИНП	БП	ДБА	ШПАУ
<i>Промышленная зона “ИрКАЗ-СУАЛ”*</i>														
2.1–4.5	0.4–0.7	2.1–7.7	1.3–4.8	1.3–3.7	1.9–3.5	3.5–13	1.0–4.2	1.9–7.1	1.4–7.3	0.4–2.2	0.6–3.0	0.8–3.6	0.2–0.9	19–54
<i>г. Шелехов, 2.5 км от промышленной зоны в северном направлении</i>														
540	63	360	180	170	240	230	85	150	140	61	100	140	27	2500
<i>пос. Олха, 2 км от промышленной зоны в юго-восточном направлении</i>														
350	39	230	120	82	120	400	140	130	120	79	160	230	51	2300
<i>пос. Баклаши, 6.5 км от промышленной зоны в северо-западном направлении</i>														
200	15	210	120	67	150	180	55	110	100	28	60	70	12	1400
<i>пос. Моты, 20 км от промышленной зоны в юго-западном направлении</i>														
12	0.7	9.4	5.2	0.8	5.4	4.2	0.5	5.5	3.1	1.7	3.7	<0.2	<0.2	52
<i>пос. Рассоха, 20 км от промышленной зоны в южном направлении</i>														
65	<0.2	43	18	5.5	24	36	15	25	12	3.8	19	23	5.1	300
<i>Мельничная падь, 20 км от промышленной зоны в восточном направлении</i>														
71	<0.2	39	12	8.0	15	23	12	22	12	5.1	20	22	<0.2	260

* В мг/м².

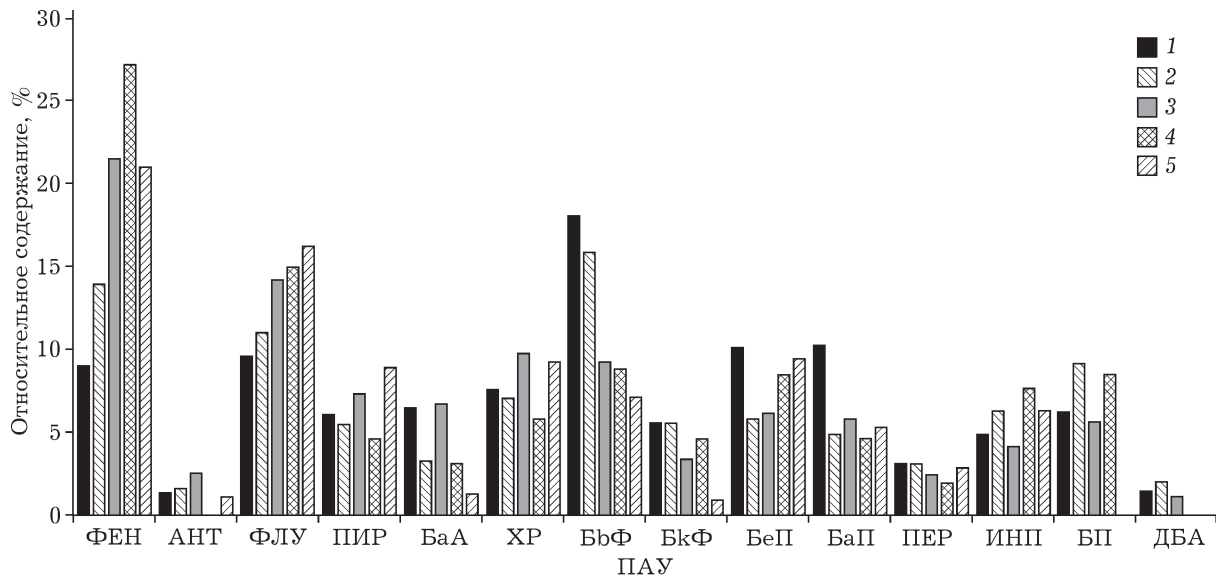


Рис. 3. Относительное содержание ПАУ (в % от ΣПАУ) в пробах снежного покрова: 1 – в промышленной зоне “ИрАЗ-СУАЛ”, 2 – в районе пос.Олха, 3 – в центральном районе г. Шелехов, 4 – в районе Мельничной пади, 5 – в районе пос. Моты.

ТАБЛИЦА 3

Содержание ПАУ в хвое сосны (С) и лиственницы (Л), нг/г

Объекты	ФЕН	АНТ	ФЛУ	ПИР	БаА	ХР	БбФ	БкФ	БеП	БаП	ПЕР	ИНП	БП	ДБА	ΣПАУ
<i>г. Шелехов, центр, 2.5 км от промышленной зоны, в северном направлении</i>															
С	250	8.5	120	110	38	210	110	49	49	33	8.8	26	28	6.8	1100
Л	980	35	1200	850	770	3100	910	320	290	120	21	110	130	24	8900
<i>пос. Олха, 2 км от промышленной зоны, в юго-восточном направлении</i>															
С	144	1.0	230	200	25	162	56	34	30	18	3.9	24	19.3	2.8	950
Л	840	19	510	310	260	1800	490	310	160	59	9.2	81	80	21	4900
<i>пос. Баклаши, 6.5 км от промышленной зоны в северо-западном направлении</i>															
С	330	37	140	85	14	100	120	1.1	49	29	2.1	0.5	<0.1	0.3	910
Л	670	17	580	380	250	1500	300	180	89	31	0.1	34	34	6.2	4100
<i>пос. Чистые ключи, 11 км от промышленной зоны в западном направлении</i>															
С	41	4.6	18	11	17	12	15	0.1	0.2	0.1	0.3	0.1	<0.1	<0.1	100
Л	240	4.6	160	70	80	310	71	36	24	7.6	0.1	11	8.2	0.2	1100
<i>пос. Дачная, 11 км от промышленной зоны в южном направлении</i>															
С	100	4.4	73	68	18	88	25	14	11	6.0	0.1	<0.1	0.1	<0.1	410
Л	560	21	380	270	200	860	170	100	51	24	0.2	23	24	0.7	2700
<i>Мельничная падь, 20 км от промышленной зоны в восточном направлении</i>															
С	47	1.1	<0.1	<0.1	21	18	5.0	42	<0.1	33	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	170
Л	270	4.8	160	120	130	610	180	77	51	16	<0.1	16	14	1.7	1700
<i>пос. Рассоха, 20 км от промышленной зоны в южном направлении</i>															
С	26	0.8	9.9	7.0	0.1	9.8	0.2	0.1	0.3	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	55
Л	260	9.0	140	87	80	260	64	53	24	15	0.2	10	12	<0.1	1000
<i>пос. Моты, 20 км от промышленной зоны в юго-западном направлении</i>															
С	31	0.4	5.2	3.8	0.1	6.3	8.9	0.1	0.2	0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	56
Л	130	4.7	68	61	56	160	45	23	13	6.3	<0.1	6.6	4.2	0.5	590

преобладают ФЕН, ФЛУ и ПИР [9, 15, 18]. Например, во фракции аренов в пробах снежного покрова с территории завода и из района пос. Олха профили ПАУ подобны, а в пробах, отобранных на расстоянии 20 км от “ИрКАЗ-СУАЛ”, резко возрастает доля ФЕН и ФЛУ и уменьшается доля БвФ (рис. 3). Рост относительного содержания ФЕН и ФЛУ во фракции ПАУ в пробах снега из центрального района г. Шелехов также может быть обусловлен наложением поллютантов из различных источников, причем соотношение БаА/БаП = 1.2, указывает на значительный вклад во фракцию ПАУ выбросов автотранспорта. В то же время в пробах снега из районов поселков Рассоха и Моты снижение соотношения БаА/БаП до уровня 0.25–0.44 свидетельствует об уменьшении этого фактора в загрязнении снежного покрова [26].

Накопление ПАУ в хвое лиственницы и сосны

Один из современных методов мониторинга загрязнения окружающей среды – оценка распределения поллютантов на контролируемой территории с применением биологических матриц. Например, для мониторинга ПАУ в Прибайкалье предложено использовать хвою сосны, восковой слой которой концентрирует органические вещества, поступающие

из атмосферы. Последующее определение уровней накопления ПАУ в хвое позволяет оценить распределение поллютантов по территории за выбранный период наблюдения [6].

В зоне рассеивания выбросов “ИрКАЗ-СУАЛ” (с преобладанием северо-западных и юго-восточных ветров) хвоя сосны и лиственницы накапливают ПАУ в количестве 55–4900 нг/г (табл. 3). Фракция ПАУ содержит 14 аренов, которые идентифицированы также в составе аэрозоля и снежного покрова. Максимальные концентрации ΣПАУ обнаружены в пробах хвои лиственницы, отобранных на расстоянии 2.5 км от “ИрКАЗ-СУАЛ”. При удалении от завода на 20 км ΣПАУ снижается в 3–10 раз, причем минимальные количества ПАУ зафиксированы для проб из района пос. Моты (см. рис. 1, юго-западное направление). Хвоя сосны накапливает ПАУ в меньших количествах по сравнению с хвоей лиственницы при отборе образцов с одних пробных участков. С удалением от промышленной зоны на 20 км содержание ΣПАУ в хвое сосны также снижается (в 15 раз в районах пос. Моты и Рассоха, рис. 4), достигая фоновых уровней (20–30 нг/г, [6]).

Фракции аренов, аккумулированных в хвое лиственницы в районе пос. Олха (2 км от алюминиевого завода в юго-восточном направлении) и незаселенного района Мельничная падь (20 км от алюминиевого завода в

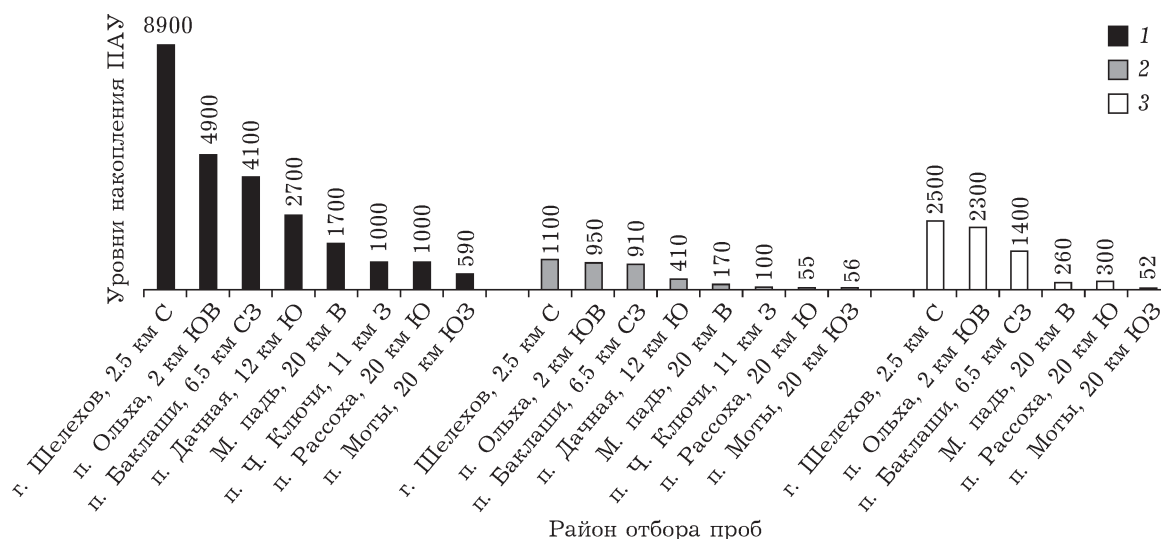


Рис. 4. Уровни накопления ПАУ: 1 – в хвое лиственницы (в нг/г); 2 – в хвое лиственницы (в нг/г); 3 – в снежном покрове (в мкг/м²).

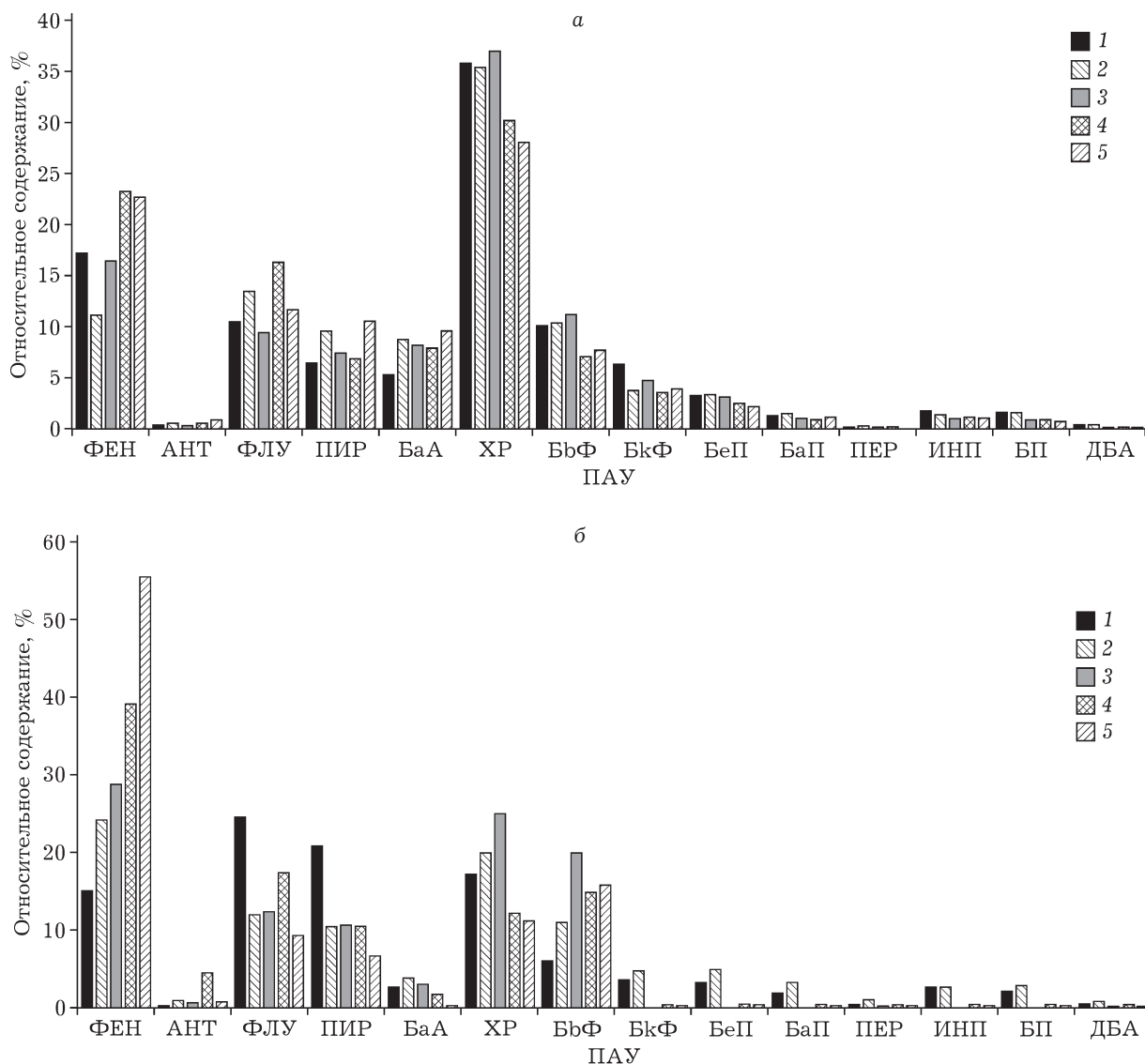


Рис. 5. Относительное содержание ПАУ (в % от ΣПАУ) в хвое лиственницы (а) и сосны (б): 1 – район пос. Олга; 2 – центральный район г. Шелехов; 3 – район Мельничной пади; 4 – район пос. Чистые ключи; 5 – район пос. Моты.

восточном направлении), характеризуются схожим соотношением ПАУ. Однако содержание ХР в ПАУ выше (~35 %) по сравнению с образцами снежного покрова из данных районов. Кроме того, в пробах, отобранных при удалении от промышленной зоны, уменьшается доля ХР и возрастает доля ФЕН (рис. 5, а).

Хвоя сосны, в отличие от хвои лиственницы, отличается доминированием ФЕН в составе фракции аренов (см. рис. 5, б). Следует отметить, что пробы хвои, отобранные на площадках в районах пос. Чистые ключи и Моты, характеризуются резким увеличением относительного содержания ФЕН (до

45–55 %) и разбросом относительного содержания ФЛУ, ПИР, ХР и БбФ. Подобный состав фракций ПАУ в хвое сосны, очевидно, обусловлен более продолжительным накоплением поллютантов по сравнению с хвоей лиственницы (в качестве биоиндикатора выбрана хвоя сосны второго года жизни [6]) и, как следствие, поступлением ПАУ из различных источников. В то же время более высокий уровень накопления ПАУ в хвое лиственницы и максимальное содержание в составе фракции аренов ХР связаны, по-видимому, с сорбционными свойствами и морфологией ее поверхностного воскового слоя [19].

Накопление ПАУ в хвое лиственницы происходит только в течение ее вегетационного периода, поэтому хвоя как биоиндикатор характеризует загрязнение воздушной среды только в теплое время года. От зимнего периода оно отличается рассеиванием загрязненных воздушных масс на большей площади [16]. Однако данные рис. 4 свидетельствуют о том, что содержание аренов в хвое лиственницы резко уменьшается с удалением от границ промышленной зоны на 20 км, т. е. площадь распространения загрязненных воздушных масс ограничена. Возможно, это связано с рельефом местности Шелеховского района [20].

Содержание ПАУ в почве

Определение ΣПАУ в почве – индикаторе состояния окружающей среды – позволяет провести оценку загрязнения исследуемого района данным классом органических поллютантов. Профили ПАУ, установленные для образцов почв с территории рассеивания выбросов “ИрКАЗ-СУАЛ”, индивидуальны и отражают поступление аренов из разных источников в течение длительного времени в условиях химической и микробиологической деградациии загрязняющих веществ.

Установлено следующее содержание ПАУ в почве промышленной зоны, нг/г: ΣПАУ 19 000–55 000, БаП 500–2400 нг/г (25–120 ПДК, ПДК БаП для почв 20 нг/г). Концентрация БаП превышает региональный геохимический фон (1–3 нг/г, [21]) в 800 раз и ха-

рактеризует почвы как объект с экстремальной степенью загрязнения [22].

За пределами промышленной зоны (район пос. Олха) содержание ΣПАУ ниже в 40 раз, а загрязнение почвы по концентрации БаП оценено как высокое. Полученные ранее результаты исследования этого района (ΣПАУ 260–1200 нг/г [21], содержание БаП 5–210 нг/г [21], 11–155 нг/г [23]) свидетельствуют о сохранении уровня загрязнения почвы (табл. 4). Следует отметить, что при удалении от территории завода на 11 и 20 км содержание ΣПАУ в почве резко снижается до 140–200 нг/г, а по концентрации БАП уровень загрязнения почвы оценен как умеренный.

Содержание ПАУ в воде и донных отложениях р. Олхи

Водосборный бассейн р. Олхи расположен в зоне рассеивания промышленных выбросов “ИрКАЗ-СУАЛ”, поэтому воды реки подвержены загрязнению ПАУ, особенно в весенний период года, во время таяния снега и сброса аккумулированных поллютантов с талыми водами. В пробах воды, отобранных на расстояниях в 2 и 20 км вверх по течению реки от промышленной зоны (см. рис. 1, а), диапазон содержаний ΣПАУ варьирует в пределах 4.2–11 (март), 68–110 (апрель) и 19–52 нг/дм³ (летние месяцы – июнь, июль) (табл. 5). Концентрация БаП в пробах, отобранных в период таяния снега (апрель), не превышала их ПДК для питьевой воды (5 дм³), но в 20–30 раз превышала фоновый уровень

ТАБЛИЦА 4
Содержание ПАУ в почве, нг/г

ФЕН	АНТ	ФЛУ	ПИР	БаА	ХР	БьФ	БкФ	БеП	БаП	ПЕР	ИНП	БП	ДБА	ΣПАУ	БаП _{ПДК}
<i>Промышленная зона “ИрКАЗ-СУАЛ”*</i>															
1.1–8.0	0.2–2.2	2.1–11	1.6–8.2	0.9–6.8	1.0–7.7	0.5–2.5	0.2–1.0	0.3–1.7	0.5–2.4	0.1–0.7	0.2–1.6	0.3–2.0	0.1–0.5	19–55	25–120
<i>пос. Олха, 2 км от промышленной зоны в южном направлении</i>															
84	13	210	160	75	94	140	49	97	110	30	79	97	19	1300	4.8
<i>пос. Дачная, 11 км от промышленной зоны в южном направлении</i>															
7.4	0.8	7.9	6.0	2.2	2.8	57	12	19	21	<2.0	5.0	58	<2.0	200	1.0
<i>пос. Рассоха, 20 км от промышленной зоны в южном направлении</i>															
21	5.0	43	34	15	33	27	25	39	21	<2.0	18	24	6.0	140	1.0

* В мкг/г.

ТАБЛИЦА 5

Содержание ПАУ в воде р. Олхи, нг/дм³

Дата отбора	ФЕН	АНТ	ФЛУ	ПИР	БаА	ХР	БьФ	БкФ	БеП	БаП	ПЕР	ИНП	БП	ΣПАУ	ΣПАУ _{ЕЭС}	БаП _{ПДК}
<i>Устье дренажного ручья золоотвала ИТЭЦ-5</i>																
03.03	32	2.1	53	48	6.5	28	20	5.3	12	21	<0.2	15	16	260	77	4.2
06.04	43	7.3	32	17	3.8	3.6	5.8	2.3	5.8	2.7	<0.2	8.6	12	140	31	0.54
25.06	2.8	<0.2	15	8.5	2.0	5.8	3.4	1.4	2.0	1.2	<0.2	<0.2	<0.2	42	6.0	0.24
25.07	200	17	410	240	130	290	340	93	210	160	49	98	120	2400	810	32
<i>2 км вниз по течению р. Олхи от устья дренажного ручья золоотвала ИТЭЦ-5</i>																
03.03	38	2.8	32	23	15	33	39	11	25	22	<0.2	34	38	310	140	4.4
06.04	31	5.3	15	94	8.2	10	13	5.3	12	5.1	<0.2	15	19	150	57	1.0
25.06	2.9	<0.2	2.6	3.0	<0.2	2.4	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	11	–	–
25.07	13	0.9	8.3	4.5	2.2	5.5	2.5	1.0	2.0	1.5	1.2	2.2	4.7	50	12	0.30
<i>2 км вверх по течению р. Олхи от промышленной зоны (пос. Олха)</i>																
03.03	4.3	<0.2	2.5	2.0	0.9	1.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	11	–	–
06.04	33	5.7	12	8.9	5.9	11	8.2	3.4	6.9	3.2	<0.2	4.4	5.4	110	25	0.64
25.06	7.0	1.2	5.0	3.4	<0.2	4.1	1.2	<0.2	0.9	1.1	<0.2	<0.2	<0.2	24	2.3	0.22
25.07	11	2.0	16	6.5	2.4	5.7	2.5	1.0	1.8	1.2	1.0	1.0	<0.2	52	5.7	0.24
<i>20 км вверх по течению р. Олхи от промышленной зоны (пос. Рассоха)</i>																
03.03	4.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	4.2	–	–
06.04	30	3.0	7.9	4.9	0.9	1.4	4.0	2.1	3.8	2.1	<0.2	3.2	4.4	68	16	0.42
25.06	6.5	0.9	4.0	1.6	<0.2	3.5	0.9	0.5	0.8	0.7	<0.2	<0.2	<0.2	19	2.1	0.14
25.07	8.0	<0.2	4.2	3.2	<0.2	2.4	2.2	<0.2	1.3	1.6	<0.2	<0.2	<0.2	23	3.8	0.32

(0.1 нг/дм³ [24]). Содержание пяти аренов, контролируемых в питьевой воде в странах ЕЭС (БьФ, БкФ, БаП, ИНП и БП, см. табл. 5), в водах р. Олхи в период ее максимального загрязнения ПАУ оказалось в 8 раз ниже ПДК_{ЕЭС} (200 нг/дм³ [25]).

Полициклические ароматические углеводороды обладают высокими гидрофобными свойствами, поэтому на границе вода – дно они перераспределяются и аккумулируются в донных отложениях. На этом основании поверхностные донные осадки служат индикаторами загрязнения водоемов и потенциальными вторичными источниками загрязнения водной массы. Установлено, что в пробах донных отложений р. Олхи (табл. 6), отобранных в 2 и 20 км вверх по течению от промышленной зоны, содержание ΣПАУ равно 300 и 140 нг/г соответственно, а БаП – 1.3 и 0.6 ПДК соответственно (ПДК БаП в донных отложениях 20 нг/г). Это свидетельствует о фоновом уровне загрязнении вод р. Олхи соединениями ПАУ при удалении на 20 км от потен-

циального источника (“ИркАЗ-СУАЛ”). При этом содержание БаП, соответствующее региональному фоновому уровню (притоки Южного Байкала – 0.7–65 нг/г, р. Ангара – 5–65 нг/г), практически не изменилось за период с 1993 г. [24].

Установлено, что соотношения ПАУ, обнаруженных в донных отложениях р. Олхи в районе ручья золоотвала ИТЭЦ-5 (см. рис. 1, в) и на расстоянии 2 км ниже по течению реки от места впадения ручья, сопоставимы. От профиля ПАУ, аккумулированных в снежном покрове промышленной зоны, они отличаются более высоким содержанием ФЛУ и ПИР, а также уменьшением относительной концентрации БьФ. Отмеченное изменение соотношения аренов может быть обусловлено поступлением ПАУ как с выбросами “ИркАЗ-СУАЛ”, так и из другого источника – ИТЭЦ-5. Это предположение подтверждается данными об экстремальном содержании ΣПАУ в образце воды, отобранной в районе сброса вод дренажного ручья золоотвала (июль, см.

ТАБЛИЦА 6

Содержание ПАУ в донных осадках р. Олхи, нг/г

ФЕН	АНТ	ФЛУ	ПИР	БаА	ХР	БьФ	БкФ	БеП	БаП	ПЕР	ИНП	БП	ДБА	ΣПАУ	БаП _{ПДК}
<i>Устье дренажного ручья золоотвала ИТЭЦ-5</i>															
85	15	190	120	93	110	97	35	60	76	23	44	46	16	1000	3.8
<i>2 км вниз по течению р. Олхи от устья дренажного ручья золоотвала ИТЭЦ-5</i>															
95	20	220	170	100	160	170	57	120	100	43	70	96	18	1500	5.0
<i>2 км вверх по течению р. Олхи от промышленной зоны (пос. Олха)</i>															
25	7.0	50	36	23	29	31	12	21	26	14	16	16	<2.0	300	1.3
<i>20 км вверх по течению р. Олхи от промышленной зоны (пос. Рассоха)</i>															
14	3.0	18	13	6.0	11	18	6.0	15	12	9.0	4.0	6.0	2.8	140	0.6

табл. 5), а также высоким уровнем накопления ПАУ в донных отложениях в 2 км ниже по течению реки от места его впадения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано распределение ПАУ в природных объектах на территории рассеивания выбросов алюминиевого завода “ИрКАЗ-СУАЛ” – мощного и стационарного источника поллютантов данного класса. Установлено экстремальное накопление ПАУ в снежном покрове промышленной зоны завода в диапазоне от 19 до 54 мг/м², в поверхностном слое почвы – от 19 до 55 мкг/г. Концентрация БаП в почве превышает ПДК в 120 раз и в 800 раз выше регионального геохимического фона. При удалении от источника на расстояние в 20 км аккумуляция ПАУ в снежном покрове резко снижается – от 200 до 1000 раз, но превышает фоновый уровень до 10 раз, содержание ПАУ в почве падает в 400 раз, и по концентрации БаП ее загрязнение оценено как умеренное.

Показана высокая эффективность хвои лиственницы как биоиндикатора загрязнения атмосферы. Накопление ПАУ в хвое лиственницы почти на порядок выше по сравнению с таковым для хвои сосны и отражает распределение поллютантов только в летнее время года. На основании анализа уровней аккумуляции ПАУ в снежном покрове, в хвое лиственницы и сосны сделан вывод о распространении ПАУ от источника их эмиссии на ограниченной территории.

Выбросы “ИрКАЗ-СУАЛ” не затрагивают южную часть водосборного бассейна р. Олхи. При удалении от промышленной зоны на 20 км чистота вод р. Олхи отвечает требованиям, предъявляемым к питьевой воде, а содержание БаП в донных отложениях соответствует региональному фоновому уровню.

Исследовано загрязнение атмосферы г. Шелехов в период ее устойчивой стратификации и при полном штиле. Концентрация БаП в данных условиях превышает ПДК в 19 раз. Установлена значительная вариабельность ΣПАУ в аэрозоле в течение суток, характеризующаяся увеличением суммарного содержания ПАУ до 30 раз и колебаниями БаП от 0.4 до 19 ПДК.

Работа выполнена в Байкальском аналитическом центре коллективного пользования СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Государственный доклад. О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2010 году. Иркутск: Облмашинформ, 2011. 400 с.
- 2 Королева Г. П., Горшков А. Г., Виноградова Т. П., Бутаков Е. В., Маринайте И. И., Ходжер Т. В. // Химия уст. разв. 1998. Т. 6, № 4. С. 327–337.
- 3 Маринайте И. И., Горшков А. Г. // Оптика атмосферы и океана. 2002. Т. 15, № 5–6. С. 450–455.
- 4 Gorshkov A. G., Marinaite I. I. // Global Atmospheric Change and its Impact on Regional Air Quality / I. Barnes (Ed.). Kluwer Acad. Publ., NATO Science, Series IV: Earth and Environmental Sciences, 2002. Vol. 16. P. 203–208.
- 5 Горшков А. Г., Никонова А. А. // Материалы VI Международн. симп. “Контроль и реабилитация окружающей среды”. Томск: Аграф-Пресс, 2008. С. 292–294.
- 6 Горшков А. Г., Михайлова Т. А., Бережная Н. С., Верещагин А. Л. // Химия уст. разв. 2008. Т. 16, № 2. С. 159–166.

- 7 Государственный доклад о состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2010 году. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Москва, 2012. 410 с.
- 8 Иркутский алюминиевый завод. URL: <http://www.rusal.ru/development/modernization/>.
- 9 Суздорф А. Р., Морозов С. В., Кузубова Л. И., Аншиц Н. Н., Аншиц А. Г. // Химия уст. разв. 1994. Т. 2, № 2–3. С. 511–540.
- 10 Качество снежного покрова. Поверхностная плотность бенз[а]пирена. Методика выполнения измерений методом ВЭЖХ. Свидетельство об аттестации МВИ № 01–2001. Госстандарт РФ ВСФ “ВНИИФТРИ”.
- 11 Качество окружающего воздуха. Массовая концентрация бенз[а]пирена. Методика выполнения измерений методом ВЭЖХ. Свидетельство об аттестации МВИ № 02–2000. Госстандарт РФ ВСФ “ВНИИФТРИ”.
- 12 Качество поверхностных и очищенных сточных вод. Массовая концентрация бенз[а]пирена. Методика выполнения измерений методом ВЭЖХ. Свидетельство об аттестации МВИ № 02–2001. Госстандарт РФ ВСФ “ВНИИФТРИ”.
- 13 Горшков А. Г. // Журн. аналит. химии. 2008. Т. 63, № 8. С. 880–886.
- 14 Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области за 2011 год. Иркутск: Форвард, 2012. 400 с.
- 15 Белых Л. И., Малых Ю. М., Пензина Э. Э., Смагунова А. Н. // Оптика атмосферы и океана. 2002. Т. 15, № 10. С. 944–948.
- 16 Аргучинцев В. К., Аргучинцева А. В., Крейсик М. А. // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14, № 3. С. 236–239.
- 17 Горшков А. Г., Маринайте И. И., Оболкин В. А., Барам Г. И., Ходжер Т. В. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11, № 8. С. 913–918.
- 18 Филлипов С. П., Павлов П. П., Кейко А. В., Горшков А. Г., Белых Л. И. // Изв. РАН. Энергетика. 2000. № 3. С. 107–117.
- 19 Di Guardo A., Zaccara S., Cerabolini B., Acciarri M., Terzaghi G., Calamari D. // Chemosphere. 2003. Vol. 52, No. 5. P. 789–797.
- 20 Винокуров М. А., Суходолов А. П. Города Иркутской области. Шелехов. URL: http://irkipedia.ru/content/shelehov_vinokurov_ma_suhodolov_ap_goroda_irkutskoy_oblasti
- 21 Белых Л. И., Горшков, А. Г., Рябчиков И. А., Серышев В. А., Маринайте И. И. // Сиб. экол. журн. 2004. Т. 11, № 6. С. 793–802.
- 22 Ровинский Ф. Я., Теплицкая Т. А., Алексеева Т. А. Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 224 с.
- 23 Смагунова А. Н., Розова О. Ф., Апрелькова Н. Ф., Белых Л. И., Киреева А. Н., Мартынова Н. А., Карпухова О. М., Иванова Е. И., Мыльникова Л. И., Ондар У. В., Базина И. Г., Бирюкова Е. В. // Экол. химия. 1999. Т. 8, № 4. С. 253–261.
- 24 Белых Л. И., Пензина Э. Э., Попов Л. Г., Баженов Б. Н., Хуторянский В. А., Серышев В. А. // Водн. ресурсы. 1997. Т. 24, № 6. С. 734–739.
- 25 Transposition of the “Council Directive 98/83/EC of 3 November 1988 on the Quality of Water in Intended for Human Consumption” into the National Laws in the EU Association Countries.
- 26 Vardar N., Esen F., Tasdemir Y. // Environ. Pollution. 2008. Vol. 155. P. 298–307.