

УДК 504.4.054+504.054

Загрязнение полиароматическими углеводородами бассейна озера Байкал: озеро Гусиное

Г. С. ШИРАПОВА¹, Н. С. УТЮЖНИКОВА¹, О. А. РАБИНА², А. И. ВЯЛКОВ², С. В. МОРОЗОВ², В. Б. БАТОВЕВ¹¹Байкальский институт природопользования Сибирского отделения РАН,
ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ 670047 (Россия)

E-mail: gshira@yandex.ru

²Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова Сибирского отделения РАН,
проспект Академика Лаврентьева, 9, Новосибирск 630090 (Россия)

E-mail: moroz@nioch.nsc.ru

(Поступила 19.11.12; после доработки 07.02.13)

Аннотация

В поверхностной воде и донных осадках оз. Гусиное (бассейн оз. Байкал) определены концентрации и профили 19 полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Обнаружено, что суммарное содержание ПАУ составляет 7.1–33.7 нг/л в поверхностной воде и 42.6–221.8 нг/г сухой массы в донных отложениях. Показано, что присутствие ПАУ в образцах поверхностной воды и донных отложениях оз. Гусиное обусловлено преимущественно локальными источниками пиролитической природы.

Ключевые слова: полиароматические углеводороды, бассейн озера Байкал

ВВЕДЕНИЕ

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) относятся к наиболее распространенным загрязнителям окружающей среды. Многие из них обладают токсичностью, высокой канцерогенной и мутагенной активностью.

Из сотен ПАУ, обнаруженных в объектах окружающей среды, в список приоритетных ПАУ Агентство по охране окружающей среды США (EPA US) для оценки экологического риска включило 16 приоритетных веществ, которые формируют основной фон загрязнения ПАУ: нафталин, аценафтилен, аценафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз(а)антрацен, хризен, бенз(б)флуорантен, бенз(к)флуорантен, бенз(а)пирен, дибенз(а, h)антрацен, бенз(г, h, i)перилен, индено(1, 2, 3-с, d)пирен [1].

В группу приоритетных ПАУ для поверхностных вод входят шесть представителей из этого списка: бенз(а)пирен, бенз(б)флуорантен (сильные канцерогены), бенз(г, h, i)перилен и индено(1, 2, 3-с, d)пирен (слабые канцерогены), а также не канцерогенные, но токсичные флуорантен и бенз(к)флуорантен. Согласно рекомендациям Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), общая концентрация приоритетных ПАУ в питьевой воде не должна превышать 0.2 мкг/л при концентрации бенз(а)пирена не более 5 нг/л [2, 3].

Как известно, в окружающую среду ПАУ поступают из пиролитических и петрогенных источников. К пиролитическим источникам относятся процессы неполного сгорания органического вещества (каменный уголь, нефть, растительные остатки, древесина), а также выбросы двигателей внутреннего сгорания. Петрогенные источники – процессы транс-

формации растительного вещества (ископаемые нефть, газ, продукты их переработки и процессы современного диагенеза) [4].

В атмосфере ПАУ преимущественно сорбированы на твердых частицах аэрозоля. Выпадение ПАУ с атмосферными осадками приводит к их накоплению в почвах и поверхностных водах [5].

Озеро Гусиное – второе после Байкала по объему водной массы среди водоемов Забайкалья, входит в буферную экологическую зону Байкальской природной территории. Река Баин-Гол, вытекающая из юго-восточной части озера, впадает в р. Селенгу – основной приток озера Байкал. Водосборная площадь бассейна оз. Гусиное равна 924 км² [6].

Оз. Гусиное подвержено существенному антропогенному воздействию. Наиболее значительные источники загрязнения, расположенные непосредственно на берегу озера, – крупнейшая в регионе Гусиноозерская ГРЭС, угольные разрезы, автомобильные и железные дороги, г. Гусиноозерск с населением около 25 тыс. человек.

Ранее была проведена оценка выпадения ПАУ на снеговой покров оз. Байкал, вблизи на-

селенных пунктов южного Прибайкалья, а также определен уровень загрязнения донных отложений притоков оз. Байкал (рек Селенги, Турки, Хаим, Баргузин), бухты Змеевой (Чивыркуйский залив) и залива Сор-Черкалово [7, 8].

Достоверная информация об уровне загрязнения оз. Гусиное опасными экотоксикантами – ПАУ, а также анализ путей поступления загрязнителей в озеро необходимы для принятия эффективных мер по сохранению его экосистемы и экосистемы бассейна оз. Байкал.

Цель данной работы – установление закономерностей поступления и распределения ПАУ в экосистеме оз. Гусиное методом хромато-масс-спектропии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследований при определении уровней загрязнения ПАУ оз. Гусиное служили пробы донных отложений и поверхностной воды, отобранные осенью 2009 г. Карта расположения станций отбора проб донных отложений и поверхностной воды представлена на рис. 1.

Образцы проб поверхностной воды консервировали добавлением концентрированной со-

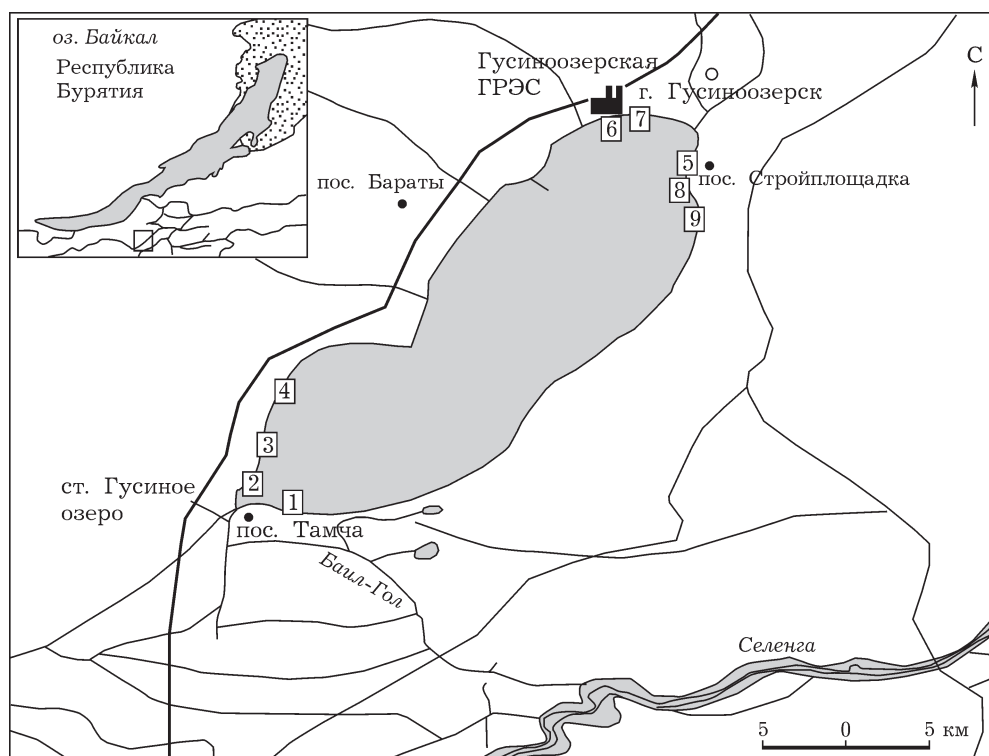


Рис. 1. Карта станций отбора экспериментального материала (1–9).

ляной кислоты классификации “ос. ч.” из расчета 1 мл кислоты на 1 л раствора.

Образцы донных отложений отбирали с приповерхностного слоя до 10 см с помощью дночерпателя (Wildlife Suply Co., USA). Образцы просушивались при комнатной температуре, просеивались через сито с размером ячейки 0.4 мм.

Пробоподготовка донных отложений (5 г) и поверхностной воды (2 л) включала экстракцию ПАУ хлористым метилом и очистку полученных экстрактов пропусканием через колонку с активированным оксидом алюминия. Для анализа полученных экстрактов использован метод хромато-масс-спектрометрии (газовый хроматограф Agilent Technologies (AT) 6890N с масс-селективным детектором AT 5975N и автосамплером AT 7683B) в режиме детектирования по индивидуальным характеристичным ионам определяемых соединений. Анализируемые компоненты разделяли на

капиллярной кварцевой колонке HP-5MS длиной 30 м, диаметром 0.25 мм и толщиной покрытия 0.25 мкм. Условия газохроматографического определения: температура детектора 280 °С, температура источника ионов 230 °С, температура квадруполя 150 °С, газ-носитель – гелий. Температура термостата колонки увеличивалась от 50 (время выдержки 2 мин) до 280 °С (время выдержки 20 мин) со скоростью 10 °С/мин. Задержка включения катода источника ионов для прохождения пика растворителя составляла 5 мин.

В экстрактах определяли 19 индивидуальных ПАУ (аценафтилен, аценафтен, нафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз(а)антрацен, хризен, бенз(к)флуорантен, бенз(б)флуорантен, бенз(а)пирен, индено(1,2,3-сд)пирен, дибенз(а, h)-антрацен, бенз(г, h, i)перилен, бенз(j)флуорантен, бенз(е)пирен, перилен), входящих в список приоритетных загрязнителей, при-

ТАБЛИЦА 1

Содержание ПАУ в образцах донных отложений, нг/г сухой массы

Соединения	Станции отбора проб								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Аценафтилен	0.1	0.2	0.2	0.4	0.9	0.7	0.8	0.6	0.3
Аценафтен	0.4	0.7	0.4	0.6	2.8	1.0	1.5	1.8	0.8
Нафталин	5.3	5.5	12.7	10.3	19.8	19.5	22.9	21.4	16.0
Флуорен	1.1	7.4	2.9	1.8	6.6	3.5	3.2	3.2	1.3
Фенантрен	9.8	51.4	19.3	13.0	35.9	17.6	22.3	17.6	8.6
Антрацен	1.4	7.7	2.5	1.4	8.0	2.6	4.4	8.0	1.2
Флуорантен	8.2	6.7	3.4	3.6	31.7	7.1	17.6	15.5	5.5
Пирен	5.6	5.3	2.2	2.3	20.0	5.9	16.2	12.5	4.2
Бенз(а)антрацен	2.6	0.4	0.5	0.8	4.4	н. о.	4.5	4.3	1.8
Хризен	4.7	1.4	1.1	2.2	11.6	1.4	16.6	10.2	3.4
Бенз(б)флуорантен	3.6	0.4	0.3	1.2	5.0	1.0	12.5	5.3	1.6
Бенз(к)флуорантен	2.9	0.4	0.2	1.2	6.4	0.7	7.6	5.8	2.1
Бенз(а)пирен	1.8	0.4	0.1	0.5	5.9	1.0	10.9	5.9	2.1
Индено(1,2,3-сд)пирен	4.8	0.1	0.1	0.6	5.2	0.0	7.4	3.9	1.6
Дибенз(а, h)антрацен	0.3	0.0	0.0	0.1	0.5	0.1	2.8	0.5	0.3
Бенз(г, h, i)перилен	8.6	0.3	0.3	0.8	6.0	0.7	17.2	5.7	2.4
Бенз(j)флуорантен	0.6	0.1	0.1	0.1	0.8	0.1	0.9	0.8	0.4
Бенз(е)пирен	4.4	0.4	0.2	1.2	5.6	0.8	18.5	6.5	2.8
Перилен	1.2	0.3	0.1	0.6	6.9	1.1	34.5	2.5	1.3
ΣПАУ по 19 соединениям	67.4	89.1	46.4	42.6	183.8	64.6	221.8	131.8	58.2
ΣПАУ по 6 соединениям	29.9	8.2	4.4	8.0	60.1	10.4	73.1	42.1	15.2

Примечание. н. о. – не обнаружено, ниже предела обнаружения – 0.02 нг/г сухой массы.

ТАБЛИЦА 2

Содержание ПАУ в образцах поверхностной воды, нг/л

Соединения	Станции отбора проб								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Аценафтилен	0.8	0.7	0.6	0.5	0.9	0.7	0.9	1.3	1.4
Аценафтен	0.9	0.7	0.8	0.7	1.1	0.6	0.4	0.7	1.1
Нафталин	12.0	2.2	7.9	0.7	3.3	5.2	2.4	11.7	7.4
Флуорен	2.1	1.1	0.9	0.7	1.5	0.8	0.8	1.1	1.3
Фенантрен	7.0	7.0	2.2	1.8	3.8	2.0	1.2	1.8	3.8
Антрацен	0.6	0.4	0.3	0.2	0.8	0.2	0.1	0.2	0.3
Флуорантен	2.1	1.5	0.6	0.7	2.7	0.7	0.7	0.5	1.9
Пирен	1.9	0.8	0.4	0.4	1.9	0.6	0.3	0.3	1.5
Бенз(а)антрацен	0.7	0.3	0.3	0.4	1.1	0.4	0.3	0.1	0.5
Хризен	0.8	0.4	0.3	0.3	1.1	0.3	0.3	0.1	0.6
Бенз(б)флуорантен	0.9	0.1	0.1	0.1	0.7	0.2	0.1	н. о.	0.3
Бенз(к)флуорантен	0.7	0.1	0.1	0.1	0.6	0.1	0.1	н. о.	0.3
Бенз(а)пирен	0.7	0.1	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1	н. о.	0.3
Индено(1,2,3-сd)пирен	0.5	0.1	н. о.	н. о.	0.2	0.1	н. о.	н. о.	0.3
Дибенз(а, h)антрацен	0.1	н. о.	н. о.	н. о.	0.1	н. о.	н. о.	н. о.	Н. о.
Бенз(g, h, i)перилен	0.6	0.1	н. о.	н. о.	0.6	0.1	0.1	н. о.	0.3
Бенз(j)флуорантен	0.1	0.1	н. о.	н. о.	0.2	н. о.	0.1	н. о.	0.1
Бенз(e)пирен	1.1	0.2	0.3	0.3	1.0	0.4	0.2	0.1	0.6
Перилен	0.3	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	н. о.	0.3
ΣПАУ по 19 соединениям	33.7	15.8	14.9	7.1	22.6	12.5	8.0	17.8	22.0
ΣПАУ по 6 соединениям	5.50	1.9	0.9	1.2	5.5	1.4	1.0	1.0	3.2

Примечание. н. о. – не обнаружено, ниже предела обнаружения – 0.05 нг/л.

нятых Европейским сообществом (ЕС). Для количественного определения использовали стандартный образец смеси ПАУ (НР № 8500-6035), в качестве суррогатного стандарта (“свидетель”) использовали 9,10-ди(тридегтерометил)фенантрен; погрешность определения не превышала 20 %; предел обнаружения 0.02 нг/г при анализе 5 г донного осадка и 0.05 нг/л при анализе 2 л воды.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 представлены результаты определения ПАУ для донных отложений оз. Гусиное. Из приведенных значений концентраций ПАУ следует, что уровень загрязнения относительно невысокий, а сумма концентраций ПАУ по 19 индивидуальным соединениям варьирует от 42.6 до 221.8 нг/г сухой массы (по шести соединениям – 4.4–73.1 нг/г). Эти значения сопоставимы с уровнем концен-

траций ПАУ в приповерхностных донных отложениях арктических районов: Нью-Олесунн (Норвегия) по сумме 15 соединений – 11–1100 нг/г, в Баренцевом море по сумме 16 соединений – 12–353 нг/г [9, 10]. В странах с высокой антропогенной нагрузкой на окружающую среду концентрация ПАУ в донных отложениях озер достигает больших значений и представляет серьезную угрозу для водных экосистем и здоровья людей из-за высокой степени биоаккумуляции ПАУ в тканях живых организмов. Например, в донных отложениях оз. Тайху (Восточный Китай) сумма ПАУ по 16 соединениям достигает 1207–4754 нг/г [11].

Среднее значение концентрации ПАУ составило 100.7 нг/г сухой массы. Наиболее высокие концентрации отмечены для фенантрена (21.6 %), нафталина (14.7 %), флуорантена (11.0 %) и пирена (8.2 %) – индикаторов антропогенных источников поступления (промыш-

ленные выбросы, хозяйственно-бытовые отходы). Максимальное содержание этих загрязнителей обнаружено для образцов № 2, 5, 7, 8, отобранных вблизи ж/д станции Гусиное озеро, пос. Стройплощадка, канала сброса очищенных сточных вод Гусиноозерской ГРЭС.

В табл. 2 представлены результаты определения ПАУ в поверхностной воде оз. Гусиное. Общая концентрация 19 индивидуальных ПАУ в поверхностных водах по сравнению с донными осадками значительно ниже и составила от 7.1 до 33.7 нг/л вследствие низкой растворимости ПАУ в воде и отсутствия заметного количества взвешенных частиц.

Среднее значение концентрации ПАУ составило 17.2 нг/л, причем наибольшим их содержанием характеризуются образцы № 1, 5, 9, отобранные вблизи населенных пунктов (пос. Тамча, пос. Стройплощадка). Максимальные концентрации обнаружены для нафталина (34.0 %), фенантрена (19.7 %), флуорантена (7.3 %) и флуорена (6.5 %), что указывает на локальные источники их поступления. В поверхностных водах оз. Гусиное содержание бенз(а)пирена составило 0.1–0.8 нг/л, что не превышает ПДК для воды водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДК составляет 0.001 мкг/л) [12].

Для определения происхождения ПАУ использованы соотношения концентраций характерных индивидуальных ПАУ, позволяющие идентифицировать источники их поступления в окружающую среду [13]. Анализ этих соотношений основан на различиях в стабильности “кинетических” и “термодинамических” изомеров ПАУ. При высокотемпературных процессах горения и/или антропогенном поступлении ПАУ в окружающую среду эти соотношения возрастают за счет увеличения доли “кинетических” изомеров [14, 15].

В табл. 3 приведены литературные данные по соотношениям концентраций ПАУ для определения источников их происхождения.

По данным табл. 4, соотношения фенантрен/антрацен и флуорантен/пирен изменялись в интервалах 2.2–9.4 и 1.1–1.6 соответственно. Средние значения свидетельствуют о преобладании ПАУ пиролитической природы в донных отложениях оз. Гусиное (рис. 2, а) [16, 17].

Соотношения антрацен/(антрацен + фенантрен) и флуорантен/(флуорантен + пирен) для донных отложений составили 0.1–0.3 и 0.5–0.6 соответственно, что также указывает на пиролитические источники происхождения ПАУ (см. рис. 2, б). Такими источниками могут служить котельные Гусиноозерской ГРЭС и ТЭЦ, на которых в качестве основного топлива используется каменный уголь [15, 18].

ТАБЛИЦА 3

Литературные данные по соотношениям концентраций ПАУ в донных отложениях, используемым для определения природы источников загрязнения

Происхождение ПАУ	Фенантрен/ антрацен [16, 17]	Флуорантен/ пирен [16, 17]	Флуорантен/ (флуорантен + пирен) [13, 15, 18]	Антрацен/ (антрацен + фенантрен) [13, 15, 18]
Пиролитическое	<10	>1	>0.5	>0.1
Петрогенное	>10	<1	<0.4	<0.1

ТАБЛИЦА 4

Соотношения концентраций ПАУ в исследованных образцах донных отложений оз. Гусиное

Соотношения ПАУ	Станции отбора проб								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Фенантрен/антрацен	7.0	6.7	7.9	9.4	4.5	6.7	5.1	2.2	7.3
Флуорантен/пирен	1.5	1.3	1.6	1.6	1.6	1.2	1.1	1.2	1.3
Флуорантен/(флуорантен + пирен)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6
Антрацен/(антрацен + фенантрен)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.3	0.1

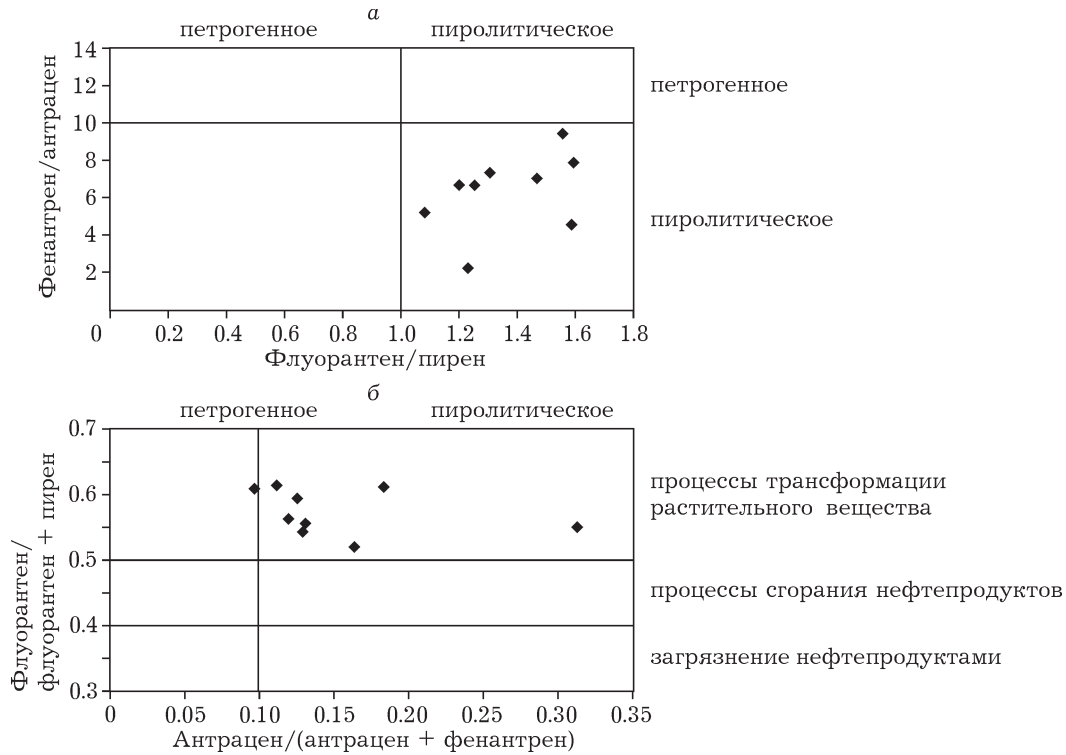


Рис. 2. Соотношения концентраций антрацен/(антрацен + фенантрен) и флуорантен/(флуорантен + пирен) (а), фенантрен/антрацен и флуорантен/пирен (б) в донных осадках оз. Гусиное. Обозн. см. табл. 3.

ТАБЛИЦА 5

Суммарные концентрация групп ПАУ с различным числом ароматических колец в донных отложениях оз. Гусиное, нг/г

Число ароматических колец	Станции отбора проб								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2-3	18.1	72.9	37.9	27.4	73.9	44.9	54.9	52.6	28.1
4	21.0	13.8	7.2	9.0	67.7	14.3	54.8	42.5	15.0
5	14.9	2.0	1.0	5.0	31.0	4.7	87.5	27.2	10.6
6	13.4	0.4	0.3	1.3	11.2	0.7	24.6	9.6	4.0

ТАБЛИЦА 6

Суммарная концентрация групп ПАУ с различным числом ароматических колец в поверхностной воде оз. Гусиное, нг/л

Число ароматических колец	Станции отбора проб								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2-3	23.3	12.1	12.6	4.5	11.3	9.4	5.8	16.6	15.3
4	5.6	2.9	1.6	1.8	6.9	1.9	1.6	1.0	4.4
5	3.9	0.7	0.7	0.1	3.7	0.9	0.6	0.1	1.8
6	1.1	0.1	0	0.1	0.8	0.3	0.1	-	0.5

В табл. 5 и 6 приведены данные по суммарным концентрациям групп ПАУ с различным числом ароматических колец в образцах донных отложений и поверхностной воды оз. Гусиное.

Суммарные концентрации группы ПАУ с двумя-тремя и четырьмя ароматическими кольцами в исследуемых образцах значительно превышает концентрации других групп, что также свидетельствует о поступлении ПАУ в результате низкотемпературных пиролитических процессов [19].

ВЫВОДЫ

Полученные данные по содержанию и профилям ПАУ, анализ соотношений характерных индивидуальных ПАУ для идентификации источников их поступления в оз. Гусиное позволяют сделать следующие выводы:

– Загрязнение соединениями ПАУ донных отложений и поверхностной воды оз. Гусиное относительно невысокое, сопоставимо с уровнем загрязнения арктических морей и обусловлено преимущественно локальными источниками пиролитической природы (сжиганием каменного угля промышленными предприятиями и дров для отопления жилых домов).

– В поверхностных водах оз. Гусиное содержание бенз(а)пирена не превышает ПДК для воды водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДК 0.001мкг/л).

– В донных отложениях и в поверхностной воде преобладают ПАУ, содержащие 2–4 ароматических кольца, причем содержание нафталина в поверхностной воде выше, чем в донных отложениях, что связано с его относительно высокой растворимостью в воде.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 09-05-90739-моб_ст, 10-05-90769-моб_ст, 11-05-01069-а, 12-12-05-90825-мол_рф_нр).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 ATSDR. Toxicological profile for polycyclic aromatic hydrocarbons // Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, 1995.
- 2 Майстренко В. Н. Эколого-аналитический мониторинг стойких органических загрязнителей. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. 323 с.
- 3 СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. М.: Минздрав РФ, 2001. 68с.
- 4 Yunker M. B., Snowdon L. R., MacDonald R. W., Smith J. N., Fowler M. G., Skibo D. N., McLaughlin F. A., Danyushevskaya A. I., Petrova V. I., Ivanov G. I. // Environ. Sci. Technol. 1996. Vol. 30. P. 1310–1320.
- 5 Рапута В. Ф., Садовский А. П., Олькин С. Е., Коковкин В. В., Морозов С. В., Вялков А. И. // Оптика атмосферы и океана. 1999. № 6. С. 540.
- 6 Борисенко И. М., Пронин Н. М., Шайбонов Б. Б. Экология озера Гусиное. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 1994. 199 с.
- 7 Горшков А. Г., Маринайте И. И., Оболкин В. А., Барам Г. И., Ходжер Т. В. Полициклические ароматические углеводороды в снежном покрове Южного побережья оз. Байкал. Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11, № 8. С. 913–918.
- 8 Батоев В. Б., Вайсфлог Л., Венцель К. Д., Цыденова О. В., Палицына С. С. // Химия уст. разв. 2003. Т. 11, № 6. С. 837–842.
- 9 Jiao L., Zheng G. J., Minh T. B., Richardson B., Chen L., Zhang Y., Yeung L. W., Lam J. C. W., Yang X., Lam P. K. S., Wong M. H. // Environ. Pollution. 2009. Vol. 157. P. 1342–1351.
- 10 Boitsov S., Jensen H. K. B., Klungsoyr J. // Marine Environ. Res. 2009. Vol. 68. P. 236–245.
- 11 Qiao M., Wang C., Huang S., Wang D., Wang Z. // Environ. Int. 2006. Vol. 32. P. 28–33.
- 12 Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. М., 2003. 94 с.
- 13 Yunker M. B., Macdonald R. W. // Arctic 1995. Vol. 48. P. 118–129.
- 14 Yunker M. B., Macdonald R. W., Vingarzan R., Mitchell H., Goyette D., Sylvestre S. // Organ. Geochem. 2002. Vol. 33. P. 489–515.
- 15 Sun J.-H., Wang G.-L., Chai Y., Zhang G., Li J., Feng J. // Ecotoxicol. Environ. Safety. 2009. Vol. 72. P. 1614–1624.
- 16 Budzinski H., Jones I., Pierard C., Garrigues P. // Marine Chem. 1997. Vol. 58. P. 85–97.
- 17 Sicre M. A., Marty J. C., Salot A., Aparicio X., Grimalt J., Albaiges J. // Atm. Environ. 1987. Vol. 21. P. 2247–2259.
- 18 Shi Z., Tao S., Pan B., Fan W., He X. C., Zuo Q., Wu S. P., Li B. G., Cao J., Liu W. X., Xu F. L., Wang X. J., Shen W. R., Wong P. K. // Environ. Pollution. 2005. Vol. 134. P. 97–111.