

И.И. МАРИНАЙТЕ, Т.В. ХОДЖЕР, М.Ю. ШИХОВЦЕВ, О.В. КУСТОВА, В.Л. ПОТЁМКИН

Лимнологический институт СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия,
marin@lin.irk.ru, khodzher@lin.irk.ru, max97irk@yandex.ru, kustova_ov@lin.irk.ru, klimat@lin.irk.ru

ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ, ПАУ, ПХБ В АТМОСФЕРЕ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ БАЙКАЛА

Представлены результаты временного и пространственного распределения аэрозольных частиц и включенных в них микропримесей (полициклические ароматические углеводороды, полихлорированные бифенилы) в приводном слое атмосферы над оз. Байкал, полученные в ходе корабельной экспедиции с 18 по 24 июля 2022 г. За исследуемый период в приводной атмосфере озера наблюдались в основном низкие значения массовой и счетной концентраций аэрозольных частиц, стойких органических загрязнителей (ПАУ, ПХБ) в сравнении с пожароопасными периодами 2016–2020 гг. За время экспедиции содержание ПАУ в атмосфере изменялось от 0,071 до 2,6 нг/м³, что ниже концентраций, зафиксированных при пожарах (0,22–133 нг/м³). Повышенное содержание исследуемых компонентов обнаружено только в отдельных районах Южного Байкала, где формирование структуры аэрозоля происходило за счет локальных источников загрязнений, расположенных в населенных прибрежных районах (пос. Листяняка, пос. Култук, г. Слюдянка, г. Байкальск), и в момент переноса загрязненных воздушных масс северо-западного направления на озеро от Иркутска и Ангарска. В пробах аэрозолей из фоновых районов преобладала группа ПАУ с двумя–тремя бензольными кольцами, в составе которых доминировали нафталин и фенантрен. Вблизи локальных источников в южной части Байкала увеличивалась доля ПАУ с четырьмя, пятью и шестью бензольными кольцами (флуорантен > пирен > бенз(б)флуорантен), которые имеют пирогенное происхождение и образуются при высокотемпературных процессах сгорания органического топлива (при сжигании угля, древесины, жидкого топлива). Выявлена положительная корреляция содержания аэрозольных частиц и ПАУ. Обнаруженные концентрации аэрозольных частиц (1,0–13,7 мкг/м³) и бенз(а)пирена (0,01–0,22 нг/м³), нормируемые в России, не превышали ПДК. Несмотря на запрет производства и ограниченное использование ПХБ, их следы обнаружены в различных промышленных и фоновых регионах во всем мире. Показано, что содержание полихлорированных бифенилов в приводной атмосфере Байкала (0,48–5,63 нг/м³) сравнимо с концентрациями, наблюдавшимися в фоновых регионах мира (0,04–25 нг/м³).

Ключевые слова: PM_{10} , $PM_{<1,0}$, стойкие органические соединения, потенциальные источники, атмосфера.

I.I. MARINAITE, T.V. HODGER, M.Y. SHIKHOVTSEV, O.V. KUSTOVA, V.L. POTEMKIN

Limnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 3, Russia, marin@lin.irk.ru, khodzher@lin.irk.ru,
max97irk@yandex.ru, kustova_ov@lin.irk.ru, klimat@lin.irk.ru

VARIABILITY OF CONCENTRATION OF AEROSOL PARTICLES, PAHS, AND PCBs IN THE ATMOSPHERE ABOVE THE SURFACE OF LAKE BAIKAL

The article presents the results of temporal and spatial distribution of aerosol particles and micro-admixtures included into them (polycyclic aromatic hydrocarbons, polychlorinated biphenyls) in the near-water layer of the atmosphere above Lake Baikal obtained during a ship expedition from July 18 to July 24, 2022. During the study period, in the lake near-water atmosphere, mainly low values of mass and number concentration of aerosol particles, and resistant organic pollutants (PAHs, PCBs) were observed compared to the fire hazard periods of 2016–2020. During the expedition, the PAHs content in the atmosphere varied from 0,071 to 2,6 ng/m³, which is lower than the concentrations established during the fires (0,22–133 ng/m³). Increased concentrations of the studied components were found only in some areas of Southern Baikal, where the formation of aerosol structure occurred due to local pollution sources situated in the populated near-shore areas (namely, Listvyanka, Kultuk, Slyudyanka, Baikalsk), and at the moment of transfer of polluted air masses northwestward to the lake from Irkutsk and Angarsk. In the aerosols samples from background areas, a PAHs group with two or three benzene rings dominated mainly by naphthalene and phenanthrene. Near local sources in the southern part of Lake Baikal, the proportion of PAHs with four, five and six benzene rings (fluoranthene > pyrene > benz(b)fluoranthene) increased; they are of pyrogenic origin and are formed at high temperature processes of organic fuel combustion (while combusting coal, wood, liquid fuel). We revealed a positive correlation between the content of aerosol particles and PAHs. The revealed concentrations of aerosol particles (1,0–13,7 μg/m³) and benz(a)pyrene

(0,01–0,22 ng/m³) rated in Russia did not exceed the MAC. Despite the prohibition of production and limited use of PCBs, their traces were found in various industrial and background regions worldwide. It is shown that polychlorinated biphenyls content in Lake Baikal near-water atmosphere (0,48–5,63 pg/m³) is comparable to the concentrations observed in background regions worldwide (0,04–25 pg/m³).

Keywords: PM_{10} , $PM_{<1,0}$, persistent organic compounds, potential sources, atmosphere.

ВВЕДЕНИЕ

Озеро Байкал является естественной природной лабораторией для анализа изменений окружающей среды и климата [1]. В настоящее время активно изучаются возможные механизмы его загрязнения через систему атмосфера–вода путем воздушного переноса и осаждения примесей как от промышленных предприятий Прибайкалья, расположенных в направлении доминирующих северо-западных ветров, так и от локальных источников на побережье озера.

Регион оз. Байкал характеризуется существенными орографическими и термическими неоднородностями, что приводит к специальному взаимодействию местных ветров с основным воздушным потоком [2]. Непосредственно в котловине озера обнаружен феномен круговой циркуляции воздуха — прибрежный вихрь, образующийся в результате действия двух факторов — термической неустойчивости и канального эффекта [3]. Наличие подобной циркуляции способствует высотному расслоению и переносу примесей вдоль береговой линии на многие десятки километров [4].

Наблюдения, проведенные в летний период 2016–2020 гг. в акватории Байкала и на прилегающих территориях, показали увеличение содержания аэрозольных частиц, газовых примесей [5, 6] за счет высокого уровня задымления от крупномасштабных лесных пожаров в Прибайкалье, Красноярском крае и Якутии. В это время в составе органической фракции дымовых шлейфов над Байкалом были обнаружены высокие суммарные концентрации (0,22–133 ng/m³) 19 полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) [7] и семи полихлорированных бифенилов (ПХБ) (0,09–1,9 pg/m³) [8]. Эти значения были выше содержания ПАУ в аэрозоле приводной атмосферы озера в 2002 г. (0,05–1,5 ng/m³) [9] и 2008 г. (0,055–1,4 ng/m³) [10], зафиксированного в относительно чистых условиях — без дымового смога от лесных пожаров. Первые данные по концентрации ПХБ в атмосфере над Байкалом, полученные в 1992–1993 гг. (10–25 pg/m³ [11]), были в десятки раз выше значений, установленных в 2019–2020 гг.

Мониторинг ПАУ и ПХБ в различных природных средах (воздухе, воде, почве) является обязательным вследствие их канцерогенной и токсической опасности для окружающей среды и здоровья населения [12]. Известно, что ПХБ и ПАУ в воздухе сорбируются на аэрозольных частицах и могут переноситься на большие расстояния даже в те регионы, где нет промышленной деятельности [13]. Будучи устойчивыми соединениями, эти органические загрязнители через атмосферный канал поступают на подстилающую поверхность и накапливаются в различных экосистемах. Так, исследованиями в конце XX в. установлено, что поступающие из атмосферы ПХБ аккумулируются в гидробионтах озера и передаются по пищевым цепям [14, 15]. Настоящая работа продолжает серию публикаций об уровне загрязнения аэрозольными частицами и его органическими микропримесями атмосферы оз. Байкал в современный период.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В продолжение регулярных исследований, проводимых с целью получения информации о механизмах и источниках загрязнения атмосферы над акваторией оз. Байкал, 18–24 июля 2022 г. с борта научно-исследовательского судна «Г.Ю. Верещагин» проводился отбор образцов для химического анализа, изучались физические характеристики аэрозоля (рис. 1).

Для исследования общей счетной концентрации и распределения частиц по размерам микродисперсной фракции аэрозоля применялся счетчик частиц Handheld 3016 IAQ фирмы Lighthouse (США), позволяющий измерять их размеры по шести каналам (0,3, 0,5, 1,0, 2,5, 5,0, 10,0 мкм), отображать дифференциальные данные о количестве частиц. Состав аэрозоля на 21 компонент ПАУ и семь индикаторных соединений ПХБ проанализирован с помощью газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием (ГХ/МС [8]). Для определения процессов переноса атмосферного аэрозоля и влияния различных источников на его формирование рассчитывались обратные траектории с использованием гибридной модели интегральной лагранжевой траектории частиц (HYSPPLIT). Траектории рассчитывались на 48 ч, стартовая высота составляла 250 м над землей.

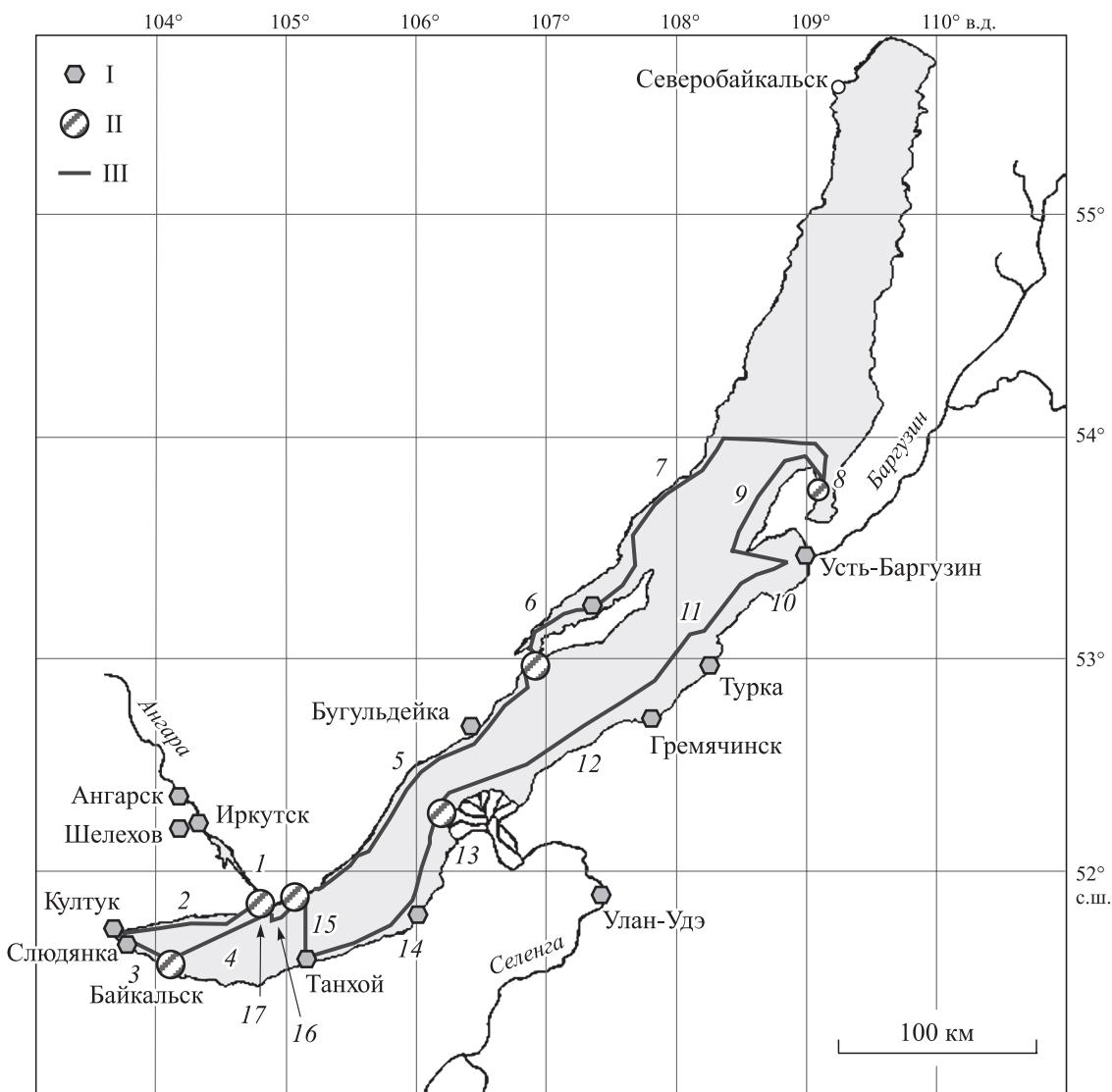


Рис. 1. Карта-схема маршрута научно-исследовательского судна «Г.Ю. Верещагин» по акватории оз. Байкал с 18 по 24 июля 2022 г.

I — населенные пункты; II — стоянки экспедиции; III — путь экспедиции. Участки маршрута: 1 — стоянка в Листвянке, 2 — Листвянка—Слюдянка, 3 — Слюдянка—Байкальск, 4 — Байкальск—Листвянка, 5 — Листвянка—Огой, 6 — Огой—Хужир, 7 — Хужир—бухта Змёёвая, 8 — Чивыркуйский залив, 9 — вдоль Святого Носа, 10 — Баргузинский залив, 11 — Максимиха—Турка, 12 — Турка—Харауз, 13 — стоянка Харауз, 14 — Харауз—Танхой, 15 — Танхой—Большие Коты, 16 — Большие Коты—Листвянка, 17 — стоянка в Листвянке.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе экспедиции было установлено, что массовая концентрация аэрозольных частиц с аэродинамическим диаметром менее 10 мкм (PM_{10}) изменялась над поверхностью Южного Байкала от 1,7 до 13,7 мкг/м³, Среднего — от 1,3 до 2,5 мкг/м³, Северного — от 1,0 до 1,9 мкг/м³. Максимальные значения концентрации PM_{10} (13,7 мкг/м³) получены в атмосфере над южной котловиной Байкала при переходе судна от пос. Листвянка до г. Слюдянки (рис. 2). В целом по акватории озера массовые концентрации частиц изменялись от 1,0 до 13,7 мкг/м³ (при среднем значении 3,1 мкг/м³) и не превышали среднесуточную величину ПДК (60 мкг/м³ [16]) для атмосферного воздуха, но были выше результатов, полученных на побережье озера при пожарах 2020 г. (0,4–9,4 мкг/м³, среднее 2,9) [17]).

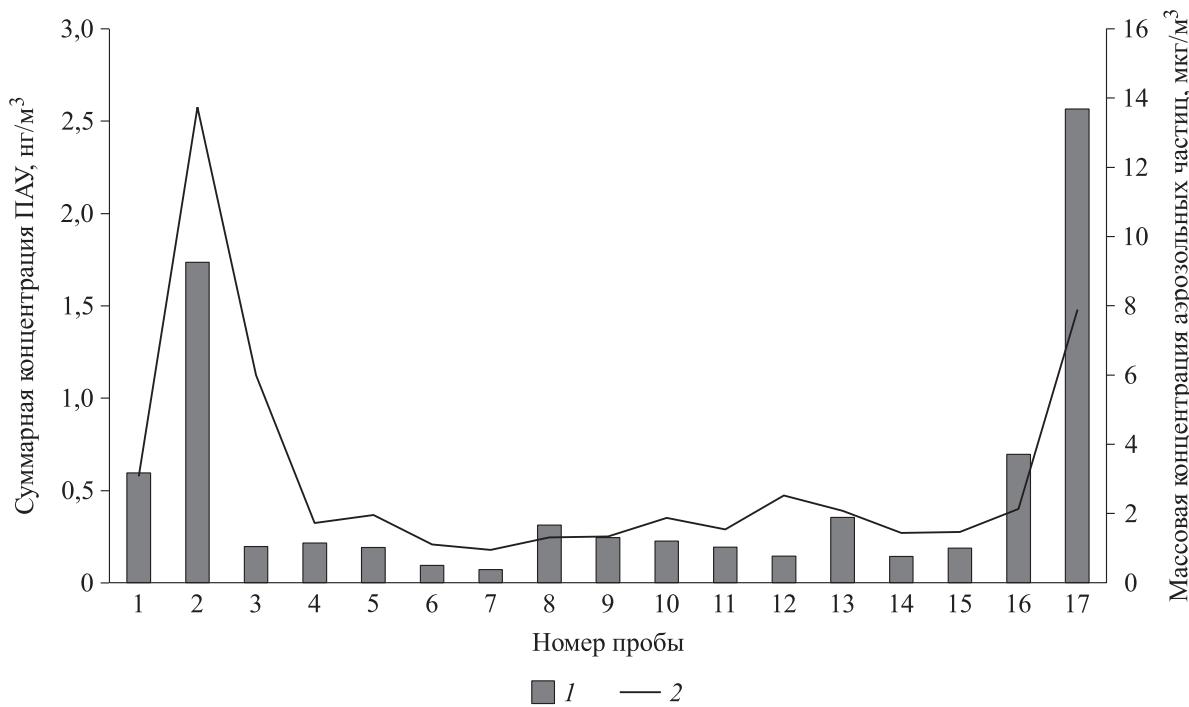


Рис. 2. Массовая концентрация аэрозольных частиц PM_{10} ($\text{мкг}/\text{м}^3$) и суммы 21 ПАУ ($\text{нг}/\text{м}^3$) в атмосфере над поверхностью оз. Байкал.

1 — ПАУ; 2 — аэрозольные частицы.

При анализе счетной концентрации аэрозольных частиц изменения отмечены как в субмикронной фракции аэрозоля (размер частиц — до 1 мкм), так и в грубодисперсной (выше 1 мкм) (рис. 3). В ходе экспедиции зафиксировано несколько эпизодов повышенной концентрации субмикронных частиц. Так, в период выпадения осадков на участке маршрута от г. Байкальска (восточное побережье

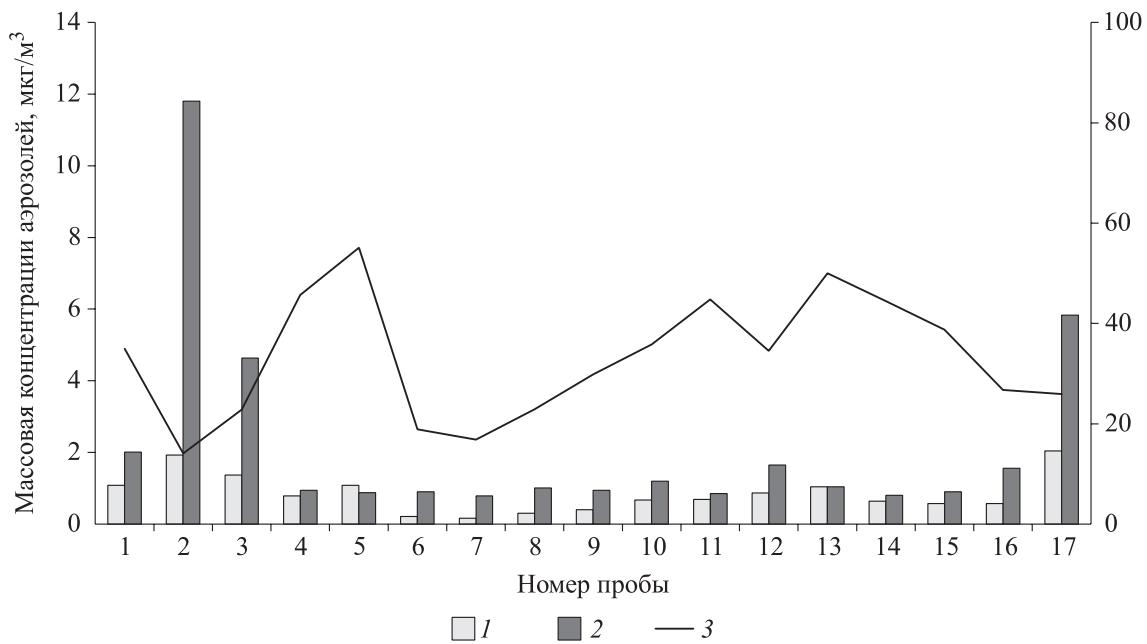


Рис. 3. Изменчивость ($\text{мкг}/\text{м}^3$) субмикронной и грубодисперсной фракции аэрозоля и доля (%) субмикронной фракции в общей массе аэрозоля в приводной атмосфере Байкала (18–24 июля 2022 г.).

1 — <1 мкм; 2 — >1 мкм; 3 — субмикронная фракция.

Южного Байкала) при пересечении озера и следовании вдоль юго-западного и западного побережья от пос. Листвянка до пролива Малое Море, вдоль о. Ольхон, количество субмикронной фракции составляло 46–55 % (см. рис. 3, пробы 4, 5). При переходе вдоль восточного побережья по направлению Баргусинский залив – пос. Турка и во время работ в устье р. Селенги было установлено, что содержание этой фракции варьирует в таких же пределах – 45–50 % (см. рис. 3, пробы 11, 13). В Южном Байкале с приближением к локальным источникам – Слюдянке, Байкальску и пос. Листвянка – количество субмикронной фракции аэрозоля резко снижалось (от 35 до 14 %) за счет роста грубодисперсной фракции (см. рис. 3, пробы 1–3, 16, 17).

Полученное распределение концентрации аэрозольных частиц соответствовало содержанию ПАУ в атмосфере над акваторией Байкала (см. рис. 2), что подтверждается тесными корреляционными связями между ними (табл. 1) и указывает на сходное расположение источников загрязнений.

За время экспедиции содержание ПАУ в атмосфере изменялось от 0,071 до 2,6 нг/м³ при среднем значении 0,4 нг/м³. Полученные данные были ниже концентраций, зафиксированных при пожарах на побережье озера в 2016 г. (0,22–133 нг/м³, среднее 5,9), и на уровне значений 2020 г. (0,07–2,5 нг/м³, среднее 0,4 нг/м³) [17]). Определено несколько эпизодов повышения концентраций ПАУ в начале (см. рис. 2, пробы 1, 2) и конце (пробы 16, 17) экспедиции, когда формирование пространственной структуры аэрозоля в приводной атмосфере над Байкалом происходило за счет локальных источников загрязнений от населенных пунктов побережья – Листвянки, Байкальска, Култука и Слюдянки. Траекторный анализ, выполненный с использованием модели HYSPLIT, показал, что во время стоянки судна 18 июля 2022 г. в 1 км от Слюдянки наблюдалось южное направление переноса воздушных масс, захватывающее город (рис. 4, а, проба 2). У пос. Листвянка (см. рис. 4, б, проба 17) имело место влияние северо-западных воздушных масс, приносящих загрязнения по долине р. Ангары от Иркутского промышленного комплекса.

При следовании вдоль западного берега из Южного Байкала в Средний и далее в Северный с пересечением озера (пос. Листвянка – о. Ольхон – бухта Змеёвая, Чевыркуйский залив) было выявлено низкое содержание суммы ПАУ в аэрозоле (см. рис. 2, пробы 5–7). Метеорологическая обстановка в этот период характеризовалась высокими значениями относительной влажности воздуха (~60–90 %), наличием небольших инверсий, низкой облачностью и периодически выпадающими осадками, которые приводили к очищению атмосферы. Согласно данным, полученным с использованием модели HYSPLIT (см. рис. 4, в), перенос осуществлялся преимущественно с северо-запада – из чистых северных районов Иркутской области. Небольшое увеличение загрязненности атмосферы отмечено только вдоль восточного побережья при переходе судна из фоновых районов Северного Байкала в Баргусинский залив (см. рис. 2, пробы 8–10). Далее при следовании в Средний Байкал (Турка – устье р. Селенги) наблюдалось снижение концентрации суммы ПАУ (пробы 11, 12) за счет низкой облачности и непрекращающихся осадков. Вследствие выноса воздушных масс из промышленных центров Бурятии вновь было зафиксировано увеличение концентрации ПАУ, отмеченное во время работ в устье р. Селенги (проба 13). В период выпадения большого количества осадков наблюдалось снижение концентрации ПАУ на переходе от устья р. Селенги до пос. Танхой и при пересечении Байкала в районе пос. Большие Коты (см. рис. 2, пробы 14, 15).

Отмечены различия в составе индивидуальных ПАУ, отобранных из разных районов над поверхностью озера (табл. 2). В пробах аэрозолей из фоновых районов (см. рис. 2, пробы 7, 8) преобладала группа ПАУ с двумя-тремя бензольными кольцами, в составе которых доминировали нафталин > фенантрен, их доля – 52–61 % от общей массы. Вблизи локальных источников в южной части Бай-

Таблица 1

Коэффициенты парной корреляции между суммарной концентрацией ПАУ и массовой концентрацией аэрозолей над поверхностью оз. Байкал

	ПАУ	TPM	PM < 1 мкм	PM > 1 мкм
ПАУ	1,00			
TPM	0,78	1,00		
PM < 1 мкм	0,79	0,86	1,00	
PM > 1 мкм	0,75	1,00	0,80	1,00

П р и м е ч а н и е. TPM – суммарная концентрация аэрозольных частиц; PM < 1 мкм – субмикронная фракции аэрозоля с размером частиц <1 мкм; PM > 1 мкм – грубодисперсная фракция аэрозоля с размером частиц >1 мкм.

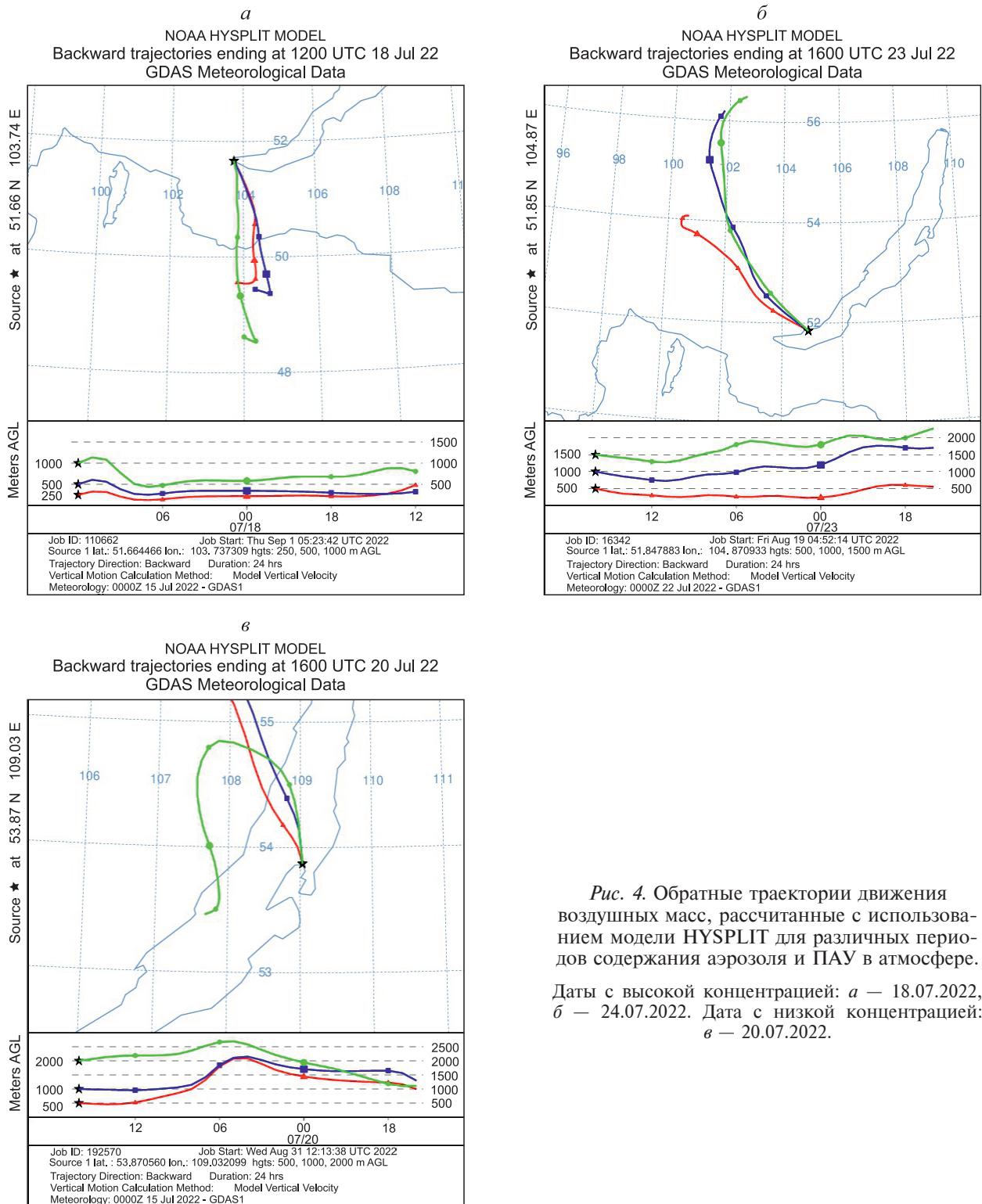


Рис. 4. Обратные траектории движения воздушных масс, рассчитанные с использованием модели HYSPLIT для различных периодов содержания аэрозоля и ПАУ в атмосфере.

Даты с высокой концентрацией: a — 18.07.2022, b — 24.07.2022. Дата с низкой концентрацией: c — 20.07.2022.

кала (пробы 2, 16, 17) до 41–69 % увеличивалась доля ПАУ с четырьмя, пятью и шестью бензольными кольцами (флуорантен > пирен > бенз(б)флуорантен). ПАУ с четырьмя и более бензольными кольцами имеют пирогенное происхождение и образуются при высокотемпературных процессах сгорания органического топлива (при сжигании угля, древесины, жидкого топлива [18]). При низких

Таблица 2

Минимальные – максимальные концентрации 21 соединения ПАУ (нг/м³)
и семи индикаторных соединений ПХБ (пг/м³) в пробах аэрозоля из фоновых районов
и районов антропогенного влияния на акваторию Байкала (18–24.07.2022)

Компонент	Фоновые районы западного и восточного побережья озера	Районы побережья, подверженные антропогенному влиянию (пос. Листвянка, г. Байкальск, г. Слюдянка)
Нафталин	0,006–0,037	0,011–0,10
2-метилнафталин	0,006–0,037	0,006–0,014
1-метилнафталин	0,004–0,030	0,003–0,062
Аценафтилен	<ПО	<ПО
Аценафтен	<ПО	<ПО
Флуорен	<ПО	<ПО
Фенантрен	0,006–0,031	0,010–0,048
Антрацен	0,002–0,005	0,002–0,007
Флуорантен	0,006–0,045	0,060–0,087
Пирен	0,004–0,011	0,036–0,045
Ретен	0,004–0,016	<0,01–0,072
Бенз(а)антрацен	0,004–0,015	0,051–0,086
Хризен	0,003–0,016	0,029–0,11
Бенз(б)флуорантен	0,004–0,035	0,015–0,57
Бенз(к)флуорантен	0,002–0,019	0,01–0,22
Бенз(е)пирен	0,004–0,023	0,01–0,35
Бенз(а)пирен	0,002–0,018	0,002–0,22
Перилен	0,001–0,005	0,014–0,035
Индено(1, 2, 3-с, d)пирен	0,004 – 0,041	<0,01–0,36
Бензо(г, h, i)перилен	0,006– 0,050	<0,01–0,47
Дибенз(а, h)антрацен	<ПО	<ПО
Сумма ПАУ	0,051–0,19	0,6–2,6
2,4,4'-трихлорбифенил (ПХБ № 28)	0,24–0,83	0,87–2,67
2,2',5,5'-тетрахлорбифенил (ПХБ № 52)	0,22–0,52	0,51–1,27
2,2',4,5,5'-пентахлорбифенил (ПХБ № 101)	0,07–0,26	0,36–1,26
2,3',4,4',5-пентахлорбифенил (ПХБ № 118)	0,06–0,17	0,21–0,42
2,2',4,4',5,5'-гексахлорбифенил (ПХБ № 153)	<ПО	<ПО
2,2',3,4,4',5'-гексахлорбифенил (ПХБ № 138)	<ПО	<ПО
2,2',3,4,4',5,5'-гептахлорбифенил (ПХБ № 180)	<ПО	<ПО
Сумма ПХБ	0,5–2,0	1,9–5,6

Примечание. <ПО – ниже предела определения.

и умеренных температурах сжигания образуются ПАУ с двумя или тремя бензольными кольцами, которые обладают высокой летучестью [19]. Отношение бензопиренов, бензо(е)пирена к бензо(а)пирену (0,5–0,7) с учетом быстрой деградации последнего подтверждало атмосферный перенос обнаруженных ПАУ от источников эмиссии в фоновые районы над поверхностью Байкала. Присутствие бензо(а)пирена, наиболее опасного канцерогена, в атмосфере над озером не превышало санитарно-гигиенических норм (1 нг/м³ [16]).

Несмотря на ограниченное использование ПХБ и запрет их производства в течение четырех последних десятилетий, их следы обнаружены в различных промышленных и фоновых регионах по всему миру [20]. Интересно, что концентрации ПХБ меняются по сезонам: зимой они выше в почве, а летом – в воздухе [21]. Такое сезонное изменение предполагает, что эмиссия ПХБ из почвы увеличивается в теплое время года за счет улетучивания, особенно низкохлорированных ПХБ. В период исследований суммарные концентрации ПХБ в приводной атмосфере Байкала определены на низком уровне (0,48–5,63 пг/м³) с максимумом в районе пос. Листвянка. Отмечено доминирование три-,

тетра-, пентахлорированных бифенилов, что указывает на дальний атмосферный перенос как основной источник ПХБ. Сравнение данных по содержанию ПХБ в атмосферном воздухе, полученных в июле 2022 г., с результатами первых исследований в этой области на Байкале в 1992 г. показало существенные различия (в десятки раз) в содержании этих соединений [11], что, вероятно, было обусловлено широким применением полихлорированных бифенилов в 1980–1990-е гг. во всем мире. Полученные нами результаты сопоставимы со значениями, зафиксированными в относительно чистых, неиндустриальных регионах мира — в Даляне на побережье Желтого моря в Китае (0,04–0,65 пг/м³), в 11 районах Патагонии на побережье оз. Аргентино в Южной Америке (25 пг/м³), на 16 фоновых станциях в Тибетском нагорье (0,1–3,9 пг/м³), на п-ове Фильдес в Западной Антарктиде (1,5–29,7 пг/м³) [20]. Эти данные позволяют сделать вывод о значительном сокращении выбросов в атмосферу указанного класса органических соединений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа результатов экспедиции на научно-исследовательском судне «Г.Ю. Верещагин» в летний период 2022 г. показана пространственно-временная картина распределения загрязняющих примесей: массовая и счетная концентрация аэрозольных частиц PM_{10} , $PM_{<1,0}$, стойких органических загрязнителей (ПАУ, ПХБ) в атмосфере над Байкалом. На вариации этих загрязняющих приводную атмосферу показателей влияли физико-географические особенности региона, синоптическая ситуация, метеоусловия, а также точечные источники загрязнения. Действующие над регионом циклоны приводили к очищению атмосферы. Основной вклад в ее загрязнение привносили близлежащие локальные источники на побережье. Обнаружена положительная корреляция концентраций ПАУ с субмикронной и грубодисперсной фракциями аэрозоля. Увеличение концентрации в 30 раз по сравнению с фоновыми значениями для ПАУ и в 12 раз для аэрозольных частиц в южной котловине Байкала наблюдалось в условиях штилевой погоды у крупных населенных пунктов — Слюдянки, Байкальска, пос. Листвянка. При этом концентрации бенз(а)пирена и аэрозольных частиц не превышали стандартов качества воздуха. Содержание ПХБ над Байкалом определено на уровне относительно чистых фоновых районов мира.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской научного фонда (19–77–20058 П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байкал — природная лаборатория для исследования изменений окружающей среды и климата: Тезисы докл. — Иркутск, 1994. — Т. 1. — С. 71.
2. Shikhovtsev A.Y., Kovadlo P.G., Lezhenin A.A., Korobov O.A., Kiselev A.V., Russkikh I.V., Kolobov D.Y., Shikhovtsev M.Y. Influence of atmospheric flow structure on optical turbulence characteristics // Applied Sciences. — 2023. — Vol. 13. — P. 1282.
3. Зуев В.Е., Антонович В.В., Белан Б.Д., Панченко М.В. Феномен круговой циркуляции воздуха в котловине озера Байкал // Докл. АН. — 1992. — Т. 325, № 6. — С. 1146–1150.
4. Панченко М.В., Белан Б.Д., Шаманаев В.С. Роль самолета-лаборатории ИОА СО РАН в изучении окружающей среды оз. Байкал // Оптика атмосферы и океана. — 1997. — Т. 10, № 4–5. — С. 463–472.
5. Ходжер Т.В., Жамсуева Г.С., Заляханов А.С., Дементьев А.Л., Цыдыпов В.В., Балин Ю.С., Пеннер И.Э., Коханенко Г.П., Насонов С.В., Клемашева М.Г., Голобокова Л.П., Потемкин В.Л. Результаты корабельных исследований аэрозольно-газовых примесей над акваторией оз. Байкал летом 2018 г. // Оптика атмосферы и океана. — 2019. — Т. 32, № 4. — С. 289–295.
6. Zhamsueva G., Zayakhanov A., Khodzher T., Tsydypov V., Balzhanov T., Dementeva A. Studies of the dispersed composition of atmospheric aerosol and its relationship with small gas impurities in the near-water layer of Lake Baikal based on the results of ship measurements in the summer of 2020 // Atmosphere. — 2022. — Vol. 13, N 1. — P. 139.
7. Marinaite I.I., Molozhnikova E.V., Khodzher T.V. PAHs transfer and intake to the water area of Lake Baikal during the summer forest fires in 2016 // Proceedings of SPIE. 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. — 2018. — N 1083374.
8. Gorshkov A.G., Izosimova O.N., Kustova O.V., Marinaite I.I., Galachyants Y.P., Sinyukovich V.N., Khodzher T.V. Wildfires as a Source of PAHs in Surface Waters of Background Areas (Lake Baikal, Russia) // Water. — 2021. — Vol. 13, N 2636. — P. 1–16.
9. Gorshkov A.G., Marinaite I.I., Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S. Benzopyrene isomer ratio in organic reaction of aerosols over water surface of Lake Baikal // Journ. of Aerosol Science. — 2004. — Vol. 2. — P. 1059–1060.

10. Голобокова Л.П., Филиппова У.Г., Маринайте И.И., Белозерова О.Ю., Горшков А.Г., Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Ходжер Т.В. Химический состав атмосферных аэрозолей над акваторией оз. Байкал // Оптика атмосферы и океана. — 2011. — Т. 24, № 3. — С. 236–241.
11. Iwata H., Tanabe S., Ueda K., Tatsukawa R. Persistent organochlorine residues in air, water, sediments, and soils from the Lake Baikal Region, Russia // Science, Environment, Science and Technology. — 1995. — Vol. 29. — P. 792–801.
12. Cetin B., Yurdakul S., Keles M., Celik I., Ozturk F., Dogan C. Atmospheric concentrations, distributions and air-soil exchange tendencies of PAHs and PCBs in a heavily industrialized area in Kocaeli, Turkey // Chemosphere. — 2017. — Vol. 183. — P. 69–79.
13. Eckhardt S., Breivik K., Mano S., Stohl A. Record high peaks in PCB concentrations in the Arctic atmosphere due to long-range transport of biomass burning emissions // Atmospheric Chemistry and Physics. — 2007. — Vol. 7. — P. 4527–4536.
14. Грачёв М.А. О современном состоянии экологической системы озера Байкал. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. — 153 с.
15. Никонова А.А., Горшков А.Г. Полихлорированные бифенилы в природных средах и биологических объектах Байкальской природной территории // Изв. Нац. акад. наук Белоруссии. Сер. хим. наук. — 2010. — Т. 1. — С. 60–63.
16. ГН 2.1.6.3492-17. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений (с изм. 31 мая 2018 г.) [Электронный ресурс]. — <https://docs.cntd.ru/document/-/556185926?ysclid=lp27lmlyot422816893> (дата обращения 10.08.2022).
17. Marinaite I.I., Potyomkin V.L., Molozhnikova E.V., Penner I.E., Shikhovtsev M.Y., Izosimova O.N., Khodzher T.V. Polycyclic aromatic hydrocarbons and PM10 solid particles above the water area of Lake Baikal in the summer of 2020 // Proceedings of SPIE. — 2021. — N 119161. — DOI: 10.1117/12.2600470
18. Tobiszewski M., Namiesnik J. PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources // Environmental Pollution. — 2012. — Vol. 162. — P. 110–119.
19. Morillo E., Romero A.S., Maqueda C., Madrid L.F. Ajmone-Marsan H. Greman, Davidson C.M., Hursthouse A.S., Villaverde J. Soil pollution by PAHs in urban soils: a comparison of three European cities // Journ. of Environmental Monitoring. — 2007. — Vol. 9, N 9. — P. 1001–1008.
20. Othman N., Ismail Z., Selamat M., Sheikh Abdul Kadir S.H., Shbraumalisi N. A review of polychlorinated biphenyls (PCBs) pollution in the air: Where and how much are we exposed to? // Intern. Journ. of Environmental Research and Public Health. — 2022. — Vol. 19. — N 13923.
21. Barbas B., Torre A., Sanz P., Navarro I., Artinano B., Martinez M. Gas/particle partitioning and particle size distribution of PCDD/Fs and PCBs in urban ambient air // Science of the Total Environment. — 2018. — N 624. — P. 170–179.

Поступила в редакцию 14.04.2023

После доработки 05.07.2023

Принята к публикации 23.11.2023