

Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 716—738.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(77):716—738.

ЭКОЛОГИЯ

Научная статья
УДК [502.3+502.521](51.53.55)
doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-716-738

Распределение полихлорированных бифенилов в системе почва–атмосфера на южном побережье озера Байкал

***Дмитрий Геннадьевич Левшин, Михаил Алексеевич Запевалов,
Антон Игоревич Бурков***

ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун», г. Обнинск, Российская Федерация, levshin@rpatyphoon.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности распределения индикаторных конгенов полихлорированных бифенилов (ПХБ) в системе почва–атмосфера в г. Байкальске и прилегающей территории. Показано, что промышленная зона Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) является вероятным источником поступления этих веществ в атмосферный воздух. Установлено превышение ориентировочно-допустимых концентраций суммы ПХБ в семнадцати пробах почв. Проведена оценка географического местоположения локального источника поступления ПХБ в атмосферу на южном побережье оз. Байкал. По данным мониторинга ПХБ в почвах и атмосферном воздухе в 2021—2023 гг. установлены направления потоков переноса ПХБ из почвы в атмосферный воздух, которые имеют выраженный сезонный характер. Для всех рассмотренных конгенов ПХБ в теплый период (апрель–октябрь) преобладает испарение с поверхности почвы.

Ключевые слова: озеро Байкал, полихлорированные бифенилы (ПХБ), атмосферный воздух, почвы, фугитивность.

Благодарности: Работа выполнена в рамках федерального проекта «Сохранение озера Байкал» национального проекта «Экология». Анализ проб выполнен в лаборатории ИПМ ФГБУ «НПО «Тайфун» (аттестат аккредитации №РА.RU.21BA01). Авторы выражают благодарность Д. П. Самсонову, А. И. Кочеткову, Е. М. Пасынковой за выполнение работ по анализу ПХБ в пробах воздуха и почв.

Для цитирования: Левшин Д. Г., Запевалов М. А., Бурков А. И. Распределение полихлорированных бифенилов в системе почва–атмосфера на южном побережье озера Байкал // Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 716—738. doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-716-738.

Original article

Distribution of polychlorinated biphenyls in the soil–atmosphere system on the southern coast of Lake Baikal

Dmitry G. Levshin, Mikhail A. Zapevalov, Anton I. Burkov

Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring Research and Production Association “Typhoon”, Obninsk, Russian Federation, levshin@rpatyphoon.ru

Summary. The article presents the current levels of polychlorinated biphenyls (PCBs) in atmospheric air and soils of the southern coast of Lake Baikal. According to the level of PCB content in the atmospheric air, the studied area can be attributed to areas exposed to man-made emissions characteristic of large industrial cities. An unorganized source of secondary PCB environmental pollution in the area of Baikalsk, located on the territory of the industrial site of the now defunct Baikalsk Pulp and Paper Mill (BPPM), as well as local sites in the areas of waste landfills, was discovered and investigated. Using statistical methods and the concept of fugitives, the geographical location and spatial dimensions of the territory that is the source of PCBs entering the atmospheric air are estimated. The area of the territory and the density of contamination of the soil surface with PCBs on it amounted to 2,7 km² and 0,013 g/m², respectively.

Based on the experimental data of PCB monitoring in soils and atmospheric air in 2021–2023, the directions of PCB transfer flows from soil to atmospheric air, which have a pronounced seasonal character, have been established. For all the considered PCB congeners, evaporation from the soil surface prevails during the year (65 % of the total number of air samples). During the cold period, equilibrium processes prevail (20 % of cases) or deposition of PCBs from the atmosphere (15 % of cases). In the warm period of the year from April to October, the calculation results demonstrate the dominance of evaporation processes (93,4 % of the total number of samples), in the remaining 6,6 % of cases, the system is in equilibrium, precipitation is not observed.

Keywords: lake Baikal, polychlorinated biphenyls (PCBs), atmospheric air, soils, fugacity.

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the federal project “Preservation of Lake Baikal” of the national project “Ecology”. The samples were analyzed in the laboratory of the IPM FSBI «NPO «Typhoon» (certificate of accreditation №RA.RU.21A01). The authors express their gratitude to D. P. Samsonov, A. I. Kochetkov, and E. M. Pasinkova for their work on the analysis of PCBs in air and soil samples.

For citation: Levshin D. G., Zapevalov M. A., Burkov A. I. Distribution of polychlorinated biphenyls in the soil–atmosphere system on the southern coast of Lake Baikal. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(77):716–738. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-716-738.

Введение

Озеро Байкал — крупнейший в мире природный пресноводный водоем, самое большое по площади водного зеркала (31500 км²) пресноводное озеро в Евразии и самое глубокое в мире (1637 м). В глубинах озера содержится 20 % мировых запасов поверхностных пресных вод и более 90 % запасов России. В нем обитает много редких и эндемичных видов флоры и фауны. В декабре 1996 г. ЮНЕСКО включило Байкал в Список объектов всемирного природного наследия [1].

Особую опасность для экосистемы Байкала представляют стойкие органические загрязняющие вещества (СОЗ), включенные в список Стокгольмской конвенции [2], распространение которых в биосфере имеет глобальный характер.

Согласно Стокгольмской конвенции производство и использование СОЗ должно быть прекращено, а имеющиеся запасы и отходы, содержащие эти соединения, ликвидированы. Особое внимание в настоящее время уделяется полихлорированным бифенилам (ПХБ): к 2025 г. должно быть выведено из эксплуатации промышленное оборудование, содержащее ПХБ, а к 2028 г. уничтожены запасы ПХБ [2].

ПХБ входят в группу стойких органических загрязнителей, обладающих высокой токсичностью, способностью к переносу на дальние расстояния и высоким потенциалом биоаккумуляции [3]. ПХБ являются ксенобиотиками — чужеродными природной среде химическими веществами. Конгенеры бифенилов присутствуют во всех природных компонентах, включая атмосферный воздух, почву, воду, донные отложения, растения, а также в организмах животных и людей. Особенностью СОЗ является их способность оказывать неблагоприятное воздействие на живые организмы даже на уровне низких концентраций. Соединения этой группы способны длительно сохраняться в окружающей среде и накапливаться в пищевых цепях. Например, по мнению исследователей из Японии [4], повышенные концентрации СОЗ в организме нерп стали причиной снижения иммунитета, что вызвало эпидемию среди нерп и их массовую гибель от чумки плотоядной в 1987—1988 гг. Местное население традиционно использует в пищу мясо и жир нерпы. Известно, что потребление мяса и жира водных млекопитающих при высоких концентрациях ПХБ может приводить к повышенной токсичной нагрузке на местное население. Уровни ПХБ в грудном молоке жительниц пос. Онгурен Иркутской области сравнимы с концентрациями, найденными у жительниц г. Серпухова Московской области, работавших на трансформаторном заводе, где в производстве использовался Совол (техническая смесь ПХБ) в начале 1990-х гг. [4].

На побережье Южного Байкала расположена промышленная площадка ныне закрытого Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК). Это крупнейший в центральной экологической зоне Байкальской природной территории источник накопленного вреда, деятельность которого на протяжении десятилетий была связана с поступлением в экосистему озера Байкал соединений группы ПХБ. Влияние прошлой деятельности БЦБК на окружающую среду как источника поступления ПХБ до настоящего времени изучена не полностью.

Существует тесная взаимосвязь между содержанием загрязняющих веществ в атмосфере и в поверхностном почвенном слое [5—7]. Основными процессами, способствующими воздушно-почвенному обмену ПХБ, являются сухое и влажное осаждение, а также испарение из почвы [8]. Совокупность и интенсивность этих процессов, обусловленных химическими и физическими свойствами веществ, в сочетании с различными параметрами почвы и воздуха (например, температурой) определяют масштабы и направление переноса [9, 10].

Учитывая, что почвы являются основным резервуаром накопления СОЗ, обмен и распределение ПХБ между сопредельными с почвой природными средами являются ключевыми процессами, контролирующими судьбу и перенос ПХБ в региональном и глобальном масштабах в условиях климатических изменений.

Целью данной работы является исследование геоэкологических процессов распределения и переноса ПХБ в сопредельных средах (почва–воздух) в районе потенциального локального источника поступления этих соединений в окружающую среду — промплощадки БЦБК вблизи г. Байкальска. Результаты получены на основе данных мониторинга за содержанием ПХБ в воздухе и почве в период 2021—2023 гг. Это послужило основой для анализа временной динамики содержания ПХБ в воздухе, выявления географических границ площадного локального источника поступления ПХБ в атмосферный воздух и направления потоков переноса ПХБ в системе почва–атмосферный воздух в зависимости от сезонных факторов.

Район, объекты и методы исследования

Географическое положение и климатические особенности. Район исследований общей площадью около 80 км² включал территории, примыкающие к промплощадке БЦБК, в том числе г. Байкальск. Отдельные пробы почв были отобраны вблизи шламохранилищ на Бабхинском и Солзанском полигонах (рис. 1).

Район обследований расположен на южном побережье озера Байкал на склоне хребта Хабар-Дабана низко- и среднегорного округа Восточно-Саянской котловинно-горной почвенной провинции. В пределах котловины Байкала его водная масса смягчает климат, в результате летом в пределах озерной котловины воздух на 6—8 °С холоднее, а поздней осенью и в начале зимы на 5—15 °С теплее, чем над окружающей сушей [8]. В период с апреля по октябрь наблюдается повышенное количество осадков на северных и северо-западных склонах хр. Хабар-Дабана. Окружающие Байкал горы трансформируют направление преобладающего в атмосфере Сибири западно-восточного переноса, вследствие чего над поверхностью озера получают развитие ветровые потоки, ориентированные вдоль и поперек озерной котловины. В летний период с мая по октябрь наибольшее значение имеют поперечные западные и северо-западные ветры (повторяемость около 33 %) и продольные юго-западные (около 12 %), а также северо-восточные с западного побережья (около 19 %) [11].

Почвенный покров. По данным [12], основными почвами в районе исследования являются грубогумусовые подбуры. При этом 15—20 % площади территории занимают дерново-подзолы и грубогумусовые буроземы; в 5—10 % случаев почвы представлены подзолами. Характерной особенностью почвообразования в этом регионе является промывной водный режим, обусловленный песчаным характером подстилающих пород, слабое разложение органического вещества, которое выражается в грубогумусном верхнем горизонте и широким диапазоном кислотности почвы. Среднее содержание органического углерода в почвах составляет 4,9 %.

Отбор проб почвы. В 2021—2023 гг. были проведены экспедиционные работы по установлению уровней загрязнений почв на территории г. Байкальска и промплощадки БЦБК. Карта-схема обследуемой территории с указанием точек отбора проб приведена на рис. 1.

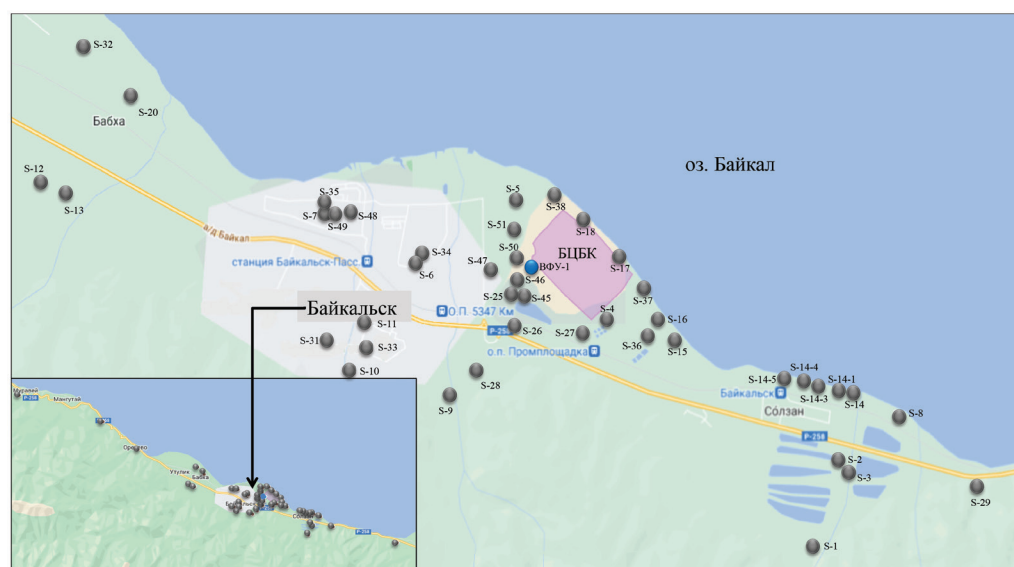


Рис. 1. Карта-схема отбора проб почвы (●) и атмосферного воздуха (●).

Fig. 1. Schematic map sampling of soil (●) and atmospheric air (●).

Для выделения особенностей вертикальной миграции ПХБ в почве и массо-обмена с атмосферой обследуемая территория была ранжирована на:

1) Территорию БЦБК (почвы, прилегающие к территории промышленной площадки БЦБК и полигоны захоронения отходов).

2) Селитебную территорию (почвы г. Байкальска и его окрестностей, включая фоновые точки).

Точечные пробы отбирали методом конверта в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017 до глубины 20 см так, чтобы каждая проба представляла собой часть почвы, типичной для исследуемых почвенных горизонтов и ключевых участков. Длина стороны квадрата в зависимости от размера участка составляла от 2 до 5—10 м. Точечные пробы одного конверта объединяли в одну и упаковывали в алюминиевую фольгу. Из каждой точки отбирали около 1 кг почвы. Суммарно было отобрано 43 пробы почв, из них 20 проб — в 2021 г., 15 проб — в 2022 г. и 8 проб — в 2023 г.

Для установления вертикального распределения ПХБ в почвенном профиле в двух точках опробования, расположенных в микрорайоне Строитель и территории промплощадки БЦБК, провели отбор проб почв до глубины 20 см послойно с шагом 5 см. Образцы на различных глубинах были собраны из вертикального почвенного разреза с помощью шпателя из нержавеющей стали. Глубину слоя почвы тщательно измеряли с помощью линейки. Такой метод отбора проб имеет преимущество по сравнению с взятием кернов почвы [5], поскольку в процессе отбора керна возможно сжатие профиля почвы, что приводит к искажению результатов измерений вертикального распределения содержания ПХБ в почве.

Атмосферный воздух. Отбор проб атмосферного воздуха проводился с использованием воздухофильтрующей установки (ВФУ) модификации МР-48-02 производства ФГБУ «НПО «Тайфун» на соответствующие аэрозольные фильтры ТFAG41 и последовательно установленные сорбенты PUF. ВФУ размещена на метеорологической станции в г. Байкальске (51.5156° с. ш., 104.17475° в. д.) (рис. 1). Отбор проб сопровождался метеорологическими наблюдениями, включающими измерения температуры воздуха и почвы, скорости и направления ветра.

Длительность отбора каждой пробы составляла около 7 суток, объем каждой пробы 4000–5000 м³. Отбор проб проводился в круглосуточном режиме в первую и третью неделю каждого месяца. Всего в период с 24.11.2021 г. по 28.12.2022 г. было отобрано 29 проб атмосферного воздуха. Особенность проведения наблюдений за ПХБ в атмосферном воздухе состоит в том, что продолжительность отбора одной пробы атмосферного воздуха составляет несколько суток.

Методы анализа. Инструментальный анализ ПХБ выполнялся на хромато-масс-спектрометре высокого разрешения Agilent 7200 Q-TOF в режиме ионизации электронами в аккредитованной лаборатории Научно-производственного объединения «Тайфун» (г. Обнинск). Пробоподготовка образцов компонентов окружающей среды определялась в полном соответствии с методикой [13]. Для контроля работы прибора в качестве внутреннего стандарта использовался ПХБ-155. Разделение аналитов выполнялось на кварцевой капиллярной колонке DB-5MS. Идентификация индивидуальных конгенов ПХБ проводилась по наличию характеристических ионов и совпадению времен удерживания выделенных на масс-хроматограмме пиков с временами удерживания конгенов ПХБ, полученных при анализе контрольной смеси.

Используемый аналитический метод позволил максимально достоверно идентифицировать аналиты. В пробах почв определяли 58 индивидуальных конгенов ПХБ, в пробах воздуха — 63 конгенера ПХБ. В настоящей работе детально рассмотрено поведение лишь некоторых бифенилов (табл. 1), включая шесть индикаторных ПХБ (№№ ИЮПАК 28, 52, 101, 138, 153 и 180), чьи концентрации в воздухе и почве были надежно измерены количественно. Перечень исследованных ПХБ включал ди-, три-, тетра-, пента-, гекса- гепта- и октахлорзамещенные конгенеры. Физико-химические свойства подробно изученных конгенов ПХБ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-химические свойства исследованных конгенов ПХБ

Physico-chemical properties of the studied PCB congeners

Наименование вещества	CAS № [14]	Молярная масса, г/моль [14]	Log K _{oA} [15—18]	Давление пара (25 °С), Па [19]
ПХБ-28	7012-37-5	257,543	Log K _{oA} = 4102/T—5,91 [15]	0,0277
ПХБ-44	41464-39-5	291,988	Log K _{oA} = 4340/T—6,20 [16]	0,0147
ПХБ-52	35693-99-3	291,988	Log K _{oA} = 4340/T—6,20 [16]	0,00497
ПХБ-66	32598-10-0	291,988	Log K _{oA} = 3827/T—3,82 [17]	0,00459
ПХБ-87	38380-02-8	326,433	Log K _{oA} = 9,25 [18]	0,00141
ПХБ-101	37680-73-2	326,433	Log K _{oA} = 4291/T—5,50 [15]	0,00358

Наименование вещества	CAS № [14]	Молярная масса, г/моль [14]	Log K _{OA} [15—18]	Давление пара (25 °C), Па [19]
ПХБ-105	32598-14-4	326,433	Log K _{OA} = 4678/T—5,68 [17]	0,00124
ПХБ-118	31508-00-6	326,433	Log K _{OA} = 4693/T—5,92 [17]	0,000167
ПХБ-138	35065-28-2	360,878	Log K _{OA} = 4584/T—5,57 [17]	0,000487
ПХБ-153	35065-27-1	360,878	Log K _{OA} = 4696/T—6,02 [17]	0,000457
ПХБ-170	35065-30-6	395,323	Log K _{OA} = 10,69 [18]	0,000372
ПХБ-180	35065-29-3	395,323	Log K _{OA} = 4535/T—4,70 [17]	0,000506
ПХБ-187	52663-68-0	395,323	Log K _{OA} = 4490/T—5,20 [16]	0,000598

Зависимость концентрации суммы исследованных конгенов ($\sum\text{ПХБ}_{13}$) от общей концентрации ПХБ ($\sum\text{ПХБ}$) имеет линейный характер и характеризуется высокими коэффициентами корреляции 0,992 (почва) и 0,997 (воздух) (рис. 2). Это подтверждает постоянство состава конгенов ПХБ в системе и представительность выборки 13 конгенов для оценивания закономерностей поведения всей группы соединений. Некоторое различие в углах наклона прямых на рис. 2 может быть объяснено тем фактором, что состав конгенов ПХБ разной степени хлорирования в почве и в атмосферном воздухе различается [20].

Внутри групп конгенов ПХБ близкой степени хлорирования наблюдается очень высокая корреляция. Конгены различной степени хлорирования

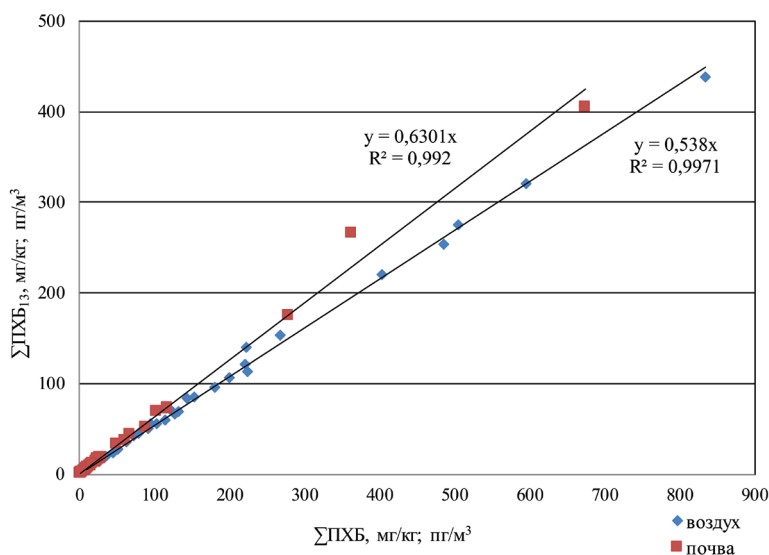


Рис. 2. Зависимость концентраций суммы конгенов $\sum\text{ПХБ}_{13}$ от $\sum\text{ПХБ}$ в атмосферном воздухе и в почве.

Fig. 2. The dependence of the concentrations of the sum of congeners $\sum\text{PCB}_{13}$ on $\sum\text{PCBs}$ in atmospheric air and in soils.

коррелированы значительно слабее. Так, коэффициенты корреляции три- и тетрахлорзамещенных конгенов ПХБ-28, 44, 52, 66 и гептахлорированных конгенов ПХБ-170, 180 составляет менее 0,5, но внутри групп коэффициенты корреляции составляют 0,7—0,9.

Массовая доля органического углерода в почвах ($C_{\text{орг}}$) определялась методом мокрого сжигания по ГОСТ 26213-91.

Расчет долей фугитивностей конгенов ПХБ. Для описания поведения (распределения и направлений переноса) микропримесей гидрофобных загрязняющих веществ в окружающей среде, например, между почвой и атмосферой, широко используется концепция (модель) фугитивности, предложенная МакКеем [14]. Фугитивность связана с концентрацией и является количественным физико-химическим параметром, характеризующим потенциал переноса вещества из одного компартмента (компонента окружающей среды) в другой. Расчет и сравнение фугитивностей на основе имеющихся данных наблюдений (концентраций) позволяет характеризовать состояние равновесия и направление переноса в окружающей среде [21]. Химические вещества имеют тенденцию переходить из природной среды, где они обладают высокой фугитивностью, в сопредельную, где фугитивность меньше [22].

Оценку отклонения распределения конгенов ПХБ в системе почва–атмосферный воздух от состояния равновесия проводился на основе показателя доли фугитивности (ff) соединения [5, 21—25], который определяется выражением:

$$ff = f_s / (f_s + f_a), \quad (1)$$

где f_s — фугитивность соединения в почве; f_a — фугитивность соединения в атмосферном воздухе. Если значение $ff = 0,5$, то наблюдается равновесие. При $ff > 0,5$ происходит поступление соединения из почвы в воздух, при $ff < 0,5$ наблюдается осаждение ПХБ из атмосферы в почву.

Учитывая существенную неопределённость при расчете фугитивности соединения как в почве, так и в воздухе, на практике считают, что при $ff < 0,3$ происходит преобладание процессов осаждения над испарением. При $ff > 0,7$ испарение преобладает над осаждением. Если доля фугитивности варьируется в диапазоне от 0,3 до 0,7, то это состояние в системе рассматривается как равновесное [23, 24, 26].

Фугитивность химического вещества в каждом конкретном компартменте рассчитывается исходя из концентрации C ($\text{г}/\text{м}^3$) по формуле [21]:

$$f = C / (Z \times M), \quad (2)$$

где M — молекулярная масса ($\text{г}/\text{моль}$), а Z (Z -значение) — ёмкость фугитивности химического вещества в компартменте ($\text{моль}/(\text{Па} \times \text{м}^3)$).

Ёмкость фугитивности исследуемого вещества в воздухе Z_a вычисляется по формуле:

$$Z_a = (R \times T)^{-1}, \quad (3)$$

где R — универсальная газовая постоянная ($\text{Па} \times \text{м}^3 / (\text{моль} \times \text{К})$); T — температура воздуха в К .

Ёмкость фугитивности исследуемого вещества в почве Z_s рассчитывается согласно выражению:

$$Z_a = (f_{oc} \times p_s \times 0,411K_{oa}) / R \times T, \tag{4}$$

где f_{oc} — концентрация органического углерода (г/кг), p_s — плотность почвы (кг/дм³), K_{oa} — коэффициент распределения октанол / воздух, 0,411 — эмпирический коэффициент [27—29].

Зависящие от температуры коэффициенты распределения октанол / воздух были оценены на основании литературных данных с использованием параметров регрессии ($\text{Log } K_{oa} = A + B/T$), приведенных в таблице 1.

Результаты исследований

Внутригодовой ход концентраций ПХБ в атмосферном воздухе. Концентрации индивидуальных конгенов и Σ ПХБ в атмосферном воздухе в период с ноября 2021 г. по декабрь 2022 г. варьировались в широком диапазоне, причем их изменение носило отчетливый сезонный характер. В теплый период концентрации ПХБ существенно возрастали по сравнению с холодным (рис. 3). Подобная

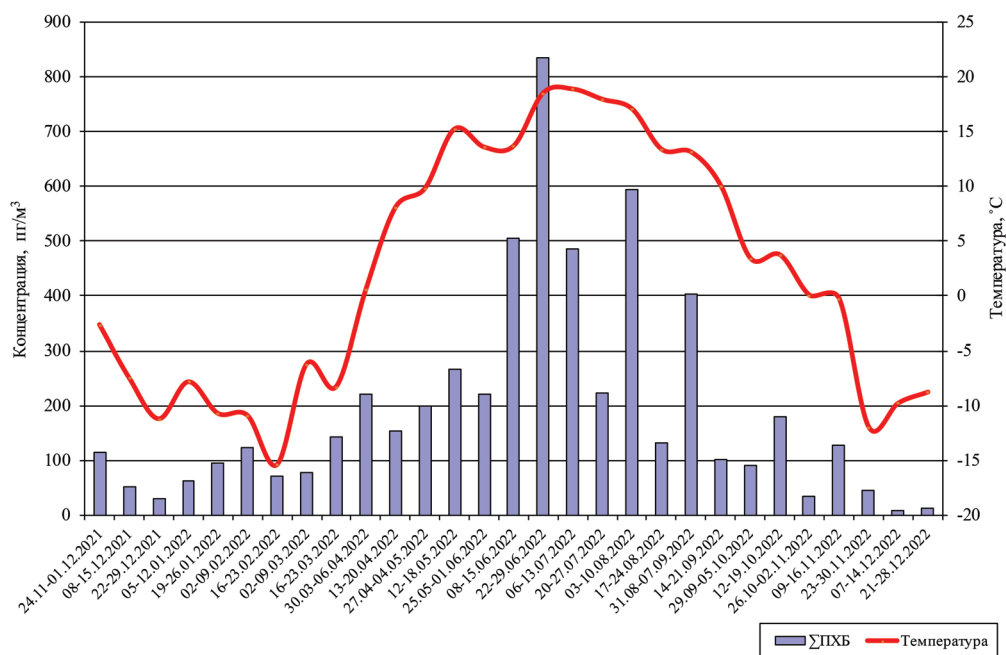


Рис. 3. Временной ход температуры почвы и концентраций Σ ПХБ в воздухе на метеостанции г. Байкальска.

Fig. 3. Time course of soil temperature and PCBs concentrations in the air at the weather station in Baikalsk.

зависимость концентраций ПХБ от температуры наблюдается независимо от географического положения станций наблюдений, причем как в фоновых районах, так и в районах с техногенным воздействием [24, 25].

Интерпретация этой зависимости основана на предположении, что в весенне-летний период с ростом температуры воздуха возрастает роль вторичных источников поступления ПХБ, связанных с улетучиванием их из почвы в атмосферный воздух [30].

В населенных пунктах, расположенных на южном побережье оз. Байкал (рис. 4), средние значения концентраций Σ ПХБ в воздухе составили:

- г. Байкальск в 2022 г. (193 $\text{пг}/\text{м}^3$);
- р.п. Култук в 2014 г. (182 $\text{пг}/\text{м}^3$);
- пгт. Танхой в 2016 г. (142 $\text{пг}/\text{м}^3$).

На противоположном берегу оз. Байкал в н.п. Листвянка уровни концентраций Σ ПХБ в 2013—2014 гг. составляли 66,6 $\text{пг}/\text{м}^3$, что примерно в 3 раза меньше по сравнению с г. Байкальском [31].

Концентрации ПХБ в городах Дальнего Востока (Владивосток, Хабаровск), полученные авторами [32] в 2011—2012 гг. с использованием пассивных пробоотборников вполне сопоставимы с данными, полученными в Байкальске (рис. 4). В крупном промышленном городе Иркутске концентрации Σ ПХБ в воздухе в 1,4 раза отличались от полученных нами результатов в меньшую сторону. В СНТ

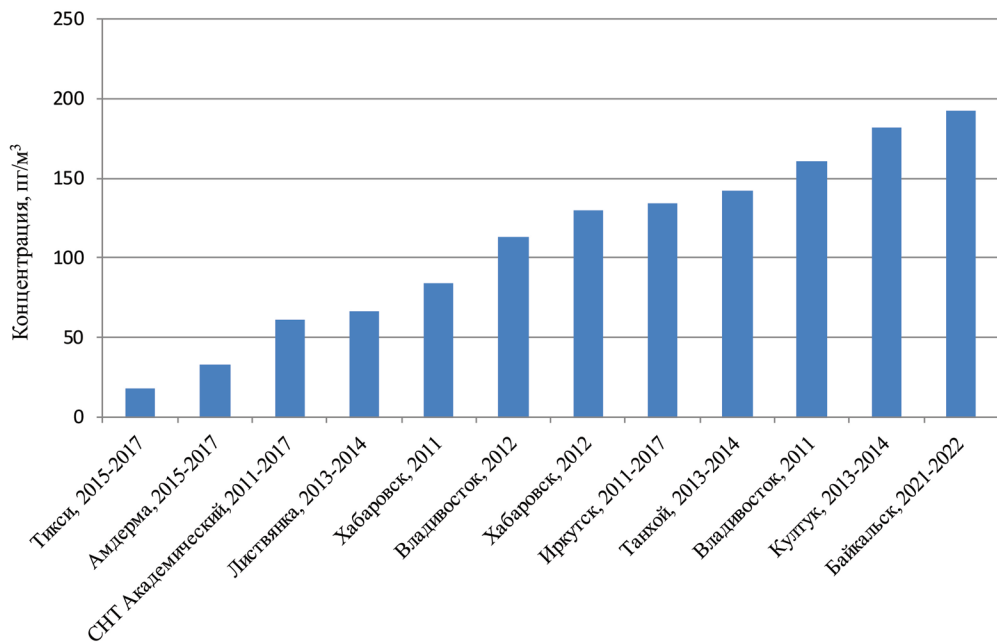


Рис. 4. Содержание Σ ПХБ в атмосферном воздухе разных населенных пунктах.

Fig. 4. Concentrations of Σ PCBs in the atmospheric air of different localities.

Академический, расположенном в 20 км с подветренной стороны от Иркутска на высоте 670 м над уровнем моря, среднее содержание Σ ПХБ находилось на уровне 61 $\mu\text{г}/\text{м}^3$ [32].

Отметим, что наблюдаемые в г. Байкальске в 2022 г. среднегодовые концентрации Σ ПХБ превышают фоновые уровни, измеренные в 2015—2017 гг. в Российской Арктике (станции Тикси и Амдерма) в 10 и 6 раз, соответственно [33].

Таким образом, исследуемый район по уровню содержания ПХБ в атмосферном воздухе можно отнести к районам, подверженным воздействию техногенных выбросов, характерных для крупных промышленных городов. Учитывая, что население г. Байкальска по состоянию на 2023 год составляет около 13 тыс. человек [34], а также практически полное отсутствие промышленного производства в городе, то для объяснения таких уровней содержания ПХБ логично предположить влияние достаточно интенсивного локального источника поступления соединений группы ПХБ, которым с наибольшей вероятностью является промплощадка БЦБК.

Уровни содержания и вертикальное распределение ПХБ в почве. ПХБ были количественно определены во всех отобранных пробах почв. В таблице 2 приведены обобщенные данные об уровнях содержания конгенов ПХБ, а также органического углерода (диапазоны, средние и медианные значения концентраций) в пробах почв в период 2021—2023 гг.

Таблица 2

Диапазон, средние и медианные значения концентраций ПХБ и органического углерода в отобранных пробах почв
Range, average and median concentrations of PCBs and organic carbon in selected soil samples

Наименование вещества	Диапазон, $\mu\text{кг}/\text{кг}$	Среднее, $\mu\text{кг}/\text{кг}$	Медиана, $\mu\text{кг}/\text{кг}$	ОДК [35], $\mu\text{кг}/\text{кг}$
ПХБ-28	0,005—6,33	0,25	0,05	1,0
ПХБ-44	0,005—2,20	0,32	0,09	—
ПХБ-52	0,02—8,98	1,04	0,20	1,0
ПХБ-66	0,01—3,60	0,53	0,17	—
ПХБ-87	0,03—12,9	1,22	0,33	—
ПХБ-101	0,06—30,9	3,85	0,76	4,0
ПХБ-105	0,005—20,2	2,57	0,61	—
ПХБ-118	0,07—44,0	5,47	1,26	4,0
ПХБ-138	0,14—78,8	7,21	1,99	4,0
ПХБ-153	0,06—82,1	6,13	1,46	4,0
ПХБ-170	0,005—28,6	1,52	0,28	—
ПХБ-180	0,005—79,4	2,73	0,37	4,0
ПХБ-187	0,005—42,6	1,50	0,18	—
Σ ПХБ ₆	0,38—266	21,1	4,61	—
Σ ПХБ	0,98—674	52,6	12,8	20,0
$C_{\text{орг}}$, $\text{мг}/\text{кг}$	10,4—117	49,0	49,9	—

Экспериментальные данные по исследованию уровней содержания ПХБ в почвах подтверждают сделанное выше предположение о наличии локального источника выбросов ПХБ вблизи г. Байкальска. Фактически измеренные уровни концентраций \sum ПХБ в пробах почв находятся в диапазоне от 0,98 до 674 мкг/кг сухого веса, что сопоставимо с концентрациями, ранее обнаруженными на территории г. Усолье-Сибирское (Иркутской обл.), где расположен химический комбинат «Усольхимпром» (\sum ПХБ от 0,92 до 530 мкг/кг) [36], а также на территориях металлургических заводов и районах демонтажей судов в Турции (\sum ПХБ варьирует от 0,3 до 461 мкг/кг) [37].

В то же время измеренные значения концентраций \sum ПХБ были ниже по сравнению с территорией хранения устаревших трансформаторов в Республике Беларусь, где концентрации \sum ПХБ достигали 7690 мкг/кг [38] или по сравнению с промзоной района «Метрогородок» (восточный административный округ г. Москвы), где максимальные концентрации достигали 4592 мкг/кг [39].

Концентрации шести индикаторных ПХБ в исследованных пробах почвы г. Байкальска изменялись от 0,38 до 266 мкг/кг сухого веса (табл. 2). Средние значения суммы индикаторных ПХБ в фоновых точках обследуемой территории (1,38 мкг/кг) были значительно ниже обнаруженных в селитебной зоне (\sum ПХБ₆ = 13,5 мкг/кг) и на территории промплощадки БЦБК (\sum ПХБ₆ = 32,0 мкг/кг).

Максимальные концентрации \sum ПХБ₆, зафиксированные вблизи шламонакопителя, были выше в 2,6 раза по сравнению с обнаруженными на территории г. Усолье-Сибирское (\sum ПХБ₆ – до 100 мкг/кг) [36, 40] и в 1,5 раза выше, чем в Южном Китае на территории, где в 1989 г. произошла разгерметизация конденсатора, а уровни индикаторных ПХБ в 2003 г. составляли 175 мкг/г [41].

Средние концентрации \sum ПХБ₆ селитебной территории г. Байкальска находятся на одном уровне со средними значениями проб почв, отобранных в г. Хабаровске в 2010–2012 гг. (\sum ПХБ₆ = 11,9 мкг/кг) [42]. Концентрации \sum ПХБ в почвах фоновых районов южного побережья Байкала (3,70 мкг/кг) не превышают средних значений аналогичных районов в мире (5,41 мкг/кг) [26].

Отметим, что для корректного сравнения измеренных в литературе уровней содержания ПХБ в почвах необходимо учитывать используемую методику определения, конгенерный состав ПХБ для расчета их суммарного содержания, глубину отбора проб почв. Если сравнивать измеренные концентрации ПХБ с гигиеническими нормативами для почвы [35], то в 17-и пробах наблюдалось превышение ОДК суммы ПХБ. Максимальное значение суммы ПХБ (33,7 ОДК в 2022 г.) было зафиксировано на территории промышленной площадки БЦБК вблизи временно-го шламонакопителя.

Обнаружено также превышение допустимых концентраций индивидуальных нормируемых конгенов ПХБ. Для ПХБ-28 среднее содержание в проанализированных пробах и наблюдавшийся максимум составляли 0,25 и 6,3 ОДК соответственно, ПХБ-52 — 1,0 и 9,0 ОДК, ПХБ-101 — 0,96 и 7,7 ОДК, ПХБ-118 — 1,4 и 11 ОДК, ПХБ-138 — 1,8 и 19,7 ОДК, ПХБ-153 — 1,5 и 20,5 ОДК, ПХБ-180 — 0,7 и 19,9 ОДК. Отметим, что вклад рассматриваемых конгенов ПХБ составлял от 56 до 75 % (по массе) от суммы всех ПХБ.

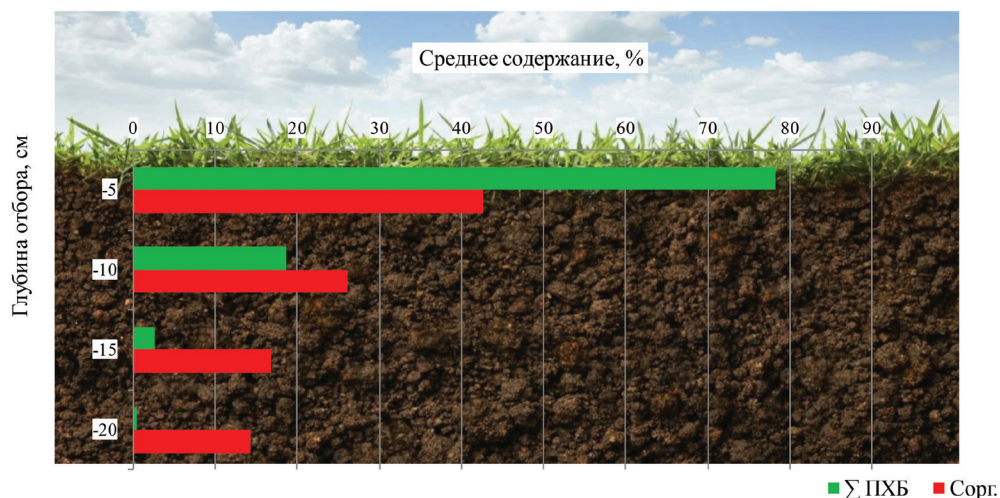


Рис. 5. Вертикальный профиль загрязнения почв конгенерами ПХБ на территории г. Байкальска.

Fig. 5. Vertical profile of soil contamination by PCB congeners in the territory of Baikal.

При изучении вертикального распределения определяемых веществ (рис. 5), оказалось, что в верхнем слое 0—10 см содержится 97 % Σ ПХБ и 68,8 % органического углерода. На глубине от 10 до 15 см обнаружено 2,6 % Σ ПХБ и около 16,9 % $C_{\text{орг}}$, на долю горизонта 15—20 см приходилось менее 0,5 % Σ ПХБ и 14,3 % $C_{\text{орг}}$. Для расчета долей фугитивности с учетом неоднородности вертикального распределения конгенов ПХБ в почве их массовые концентрации в слое 0—20 см были пересчитаны и приведены к толщине слоя 0—10 см.

Ключевую роль в поглощении токсичных загрязняющих веществ гидрофобной природы играет органический углерод почв. Содержание органического вещества является важным фактором для сорбции органических соединений [8, 28, 43]. Некоторые авторы [24] отмечают высокую пространственную корреляцию уровней содержания ПХБ и органического углерода почв.

По полученным экспериментальным данным значимой пространственной корреляции между содержанием ПХБ и органического углерода в почве на всей обследуемой территории обнаружено не было, что свидетельствует о техногенной природе формирования загрязнения почв ПХБ.

Географическое положение и пространственные размеры источника загрязнения почв ПХБ. Для определения размеров потенциального источника поступления ПХБ было рассмотрено распределение по площади уровней концентраций конгенов ПХБ в почве. Одновременно с этим для оценки направления переноса в системе почва–атмосферный воздух в каждой точке опробования использовали показатель доли фугитивности, рассчитанный по формуле (1).

Были рассчитаны статистические параметры массивов данных обеих территорий, которые показали смешанный характер статистического распределения,

который отличается от нормального. Рассчитанные величины средних и медианных концентраций конгенов и суммы ПХБ обеих территорий существенно различаются (табл. 3). Для подтверждения статистически значимого различия массивов данных использовали непараметрический U-критерий Манна-Уитни. Как следует из данных таблицы 3, для всех конгенов ПХБ, кроме ПХБ 28, 44 и 170, вклад которых по массе с \sum ПХБ не превышает 5 %, наблюдаются статистически значимые различия массивов данных при доверительной вероятности 0,95.

Таблица 3

Диапазон и статистические параметры ПХБ в почвах на промплощадке БЦБК и в селитебной зоне г. Байкальска
Range and statistical parameters PCB observations in soils at the BPPM industrial site and in the residential area of Baikalsk

Наименование вещества	Территория БЦБК		Селитебная территория		U критерий Манна-Уитни		
	Диапазон, мкг/кг	Среднее (медиана), мкг/кг	Диапазон, мкг/кг	Среднее (медиана), мкг/кг	Z	p-level	Значимость различий на уровне 0,05
ПХБ-28	0,01—6,33	0,10 (0,05)	0,01—0,20	0,05 (0,03)	1,20	0,228	—
ПХБ-44	0,01—2,20	0,31 (0,08)	0,01—0,57	0,10 (0,03)	1,77	0,077	—
ПХБ-52	0,03—8,98	1,43 (0,43)	0,02—3,19	0,43 (0,13)	2,34	0,019	+
ПХБ-66	0,04—3,6	0,70 (0,24)	0,01—1,53	0,26 (0,08)	2,59	0,010	+
ПХБ-87	0,03—12,0	1,73 (0,64)	0,03—3,11	0,43 (0,14)	2,94	0,003	+
ПХБ-101	0,07—30,9	5,57 (1,70)	0,06—9,35	1,20 (0,36)	3,03	0,002	+
ПХБ-105	0,03—20,2	3,59 (0,97)	0,01—6,64	0,85 (0,23)	2,83	0,005	+
ПХБ-118	0,10—44,0	7,82 (2,03)	0,07—14,5	1,85 (0,44)	2,88	0,004	+
ПХБ-138	0,14—78,8	10,6 (2,69)	0,14—16,6	2,03 (0,62)	3,02	0,003	+
ПХБ-153	0,06—82,1	9,01 (2,26)	0,08—14,3	1,69 (0,61)	2,55	0,011	+
ПХБ-170	0,01—28,6	1,74 (0,27)	0,01—1,19	0,20 (0,07)	1,85	0,064	—
ПХБ-180	0,01—79,4	4,19 (0,43)	0,01—1,75	0,34 (0,17)	2,49	0,013	+
ПХБ-187	0,01—42,6	2,08 (0,19)	0,01—0,71	0,16 (0,09)	2,34	0,019	+
\sum ПХБ	1,01—674,2	76,6 (21,8)	0,98—116,5	15,6 (4,84)	2,83	0,005	+

Для расчета долей фугитивностей использовано значение фугитивности в конкретной точке почвы и значение фугитивности в воздухе, рассчитанное для конкретного конгенера ПХБ с использованием медианной концентрации в воздухе за теплый период 2022 г. (апрель-октябрь).

По результатам расчетов установлено, что семь проб почвы (S-4, S-7, S-13, S-18, S-19, S-25 и S-39) являются очевидными источниками поступления всех рассматриваемых индивидуальных конгенов ПХБ в окружающий воздух ($ff > 0,7$). Еще тринадцать проб (S-2, S-11, S-16, S-17, S-26, S-27, S-33, S-35–S-37, S-47, S-50 и S-51) также являются источниками загрязнения атмосферы некоторыми ПХБ, а средняя доля фугитивностей варьируется от 0,7 до 0,8. Незначительные точечные источники поступления были зафиксированы в микрорайонах «Южный» и «Строитель» города Байкальска, а также на Бабхинском и Солзанском полигонах шламонакопителей (рис. 6). Основная часть проб, доля

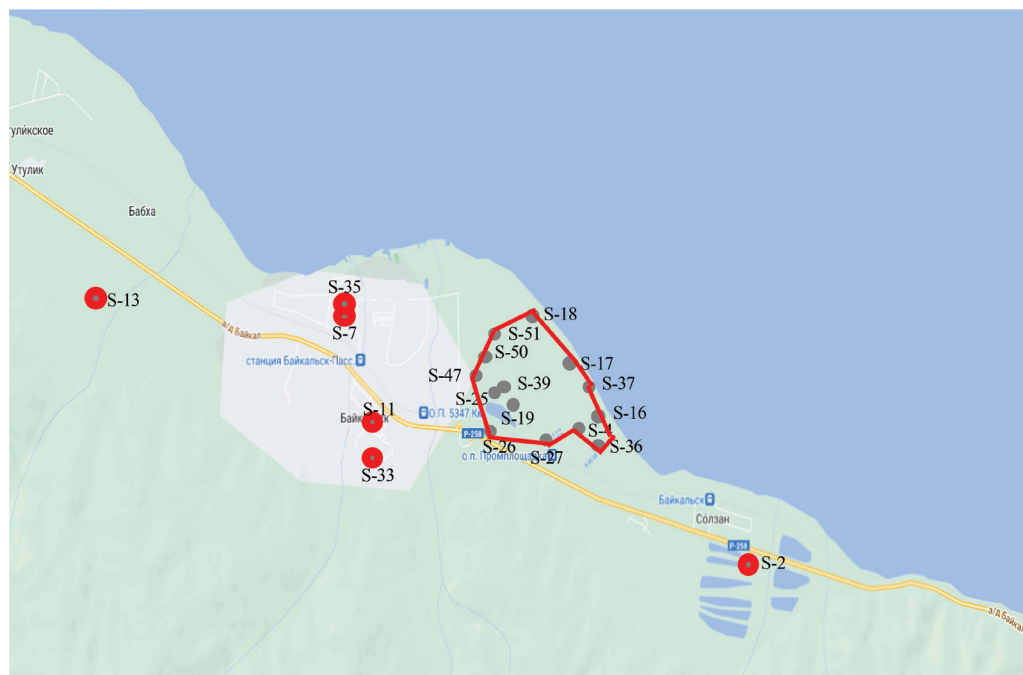


Рис. 6. Карта-схема загрязнения почв в г. Байкальске конгенерами ПХБ.

Fig. 6. Schematic map of soil pollution in the city of Baikal by PCB congeners.

фугитивности которых $ff \geq 0,7$, расположена на территории, непосредственно прилегающей к БЦБК.

Зная оценки фугитивности $ff \geq 0,7$, несложно получить границы территории, внутри которой почва загрязнена так, что она является источником поступления конгенов ПХБ в воздух за счет испарения (рис. 6). Внутри этой территории попадает промплощадка Байкальского целлюлозно-бумажного комбината, площадь которой составляет 1,16 км².

Общая площадь территории, включая промплощадку БЦБК, с поверхности которой происходит испарение ПХБ, может быть оценена величиной 2,7 км². Плотность загрязнения почвы ПХБ на этой территории оценена по медианной концентрации \sum ПХБ 21,8 мкг/кг (табл. 3) в предположении, что весь запас ПХБ сосредоточен в верхнем 10 см слое почвы. Плотность загрязнения почвы ПХБ составила 0,013 г/м².

Достаточно показательно сравнение долей фугитивности конгенов ПХБ различной степени хлорирования, полученных при расчете в двух группах почв. Как следует из рис. 7, с увеличением доли хлорирования конгенов ПХБ наблюдается снижение доли фугитивности и, соответственно, снижается вклад конгенов высокой степени хлорирования в атмосферный перенос в составе суммы ПХБ. С точки зрения физических процессов этот процесс вполне понятен,

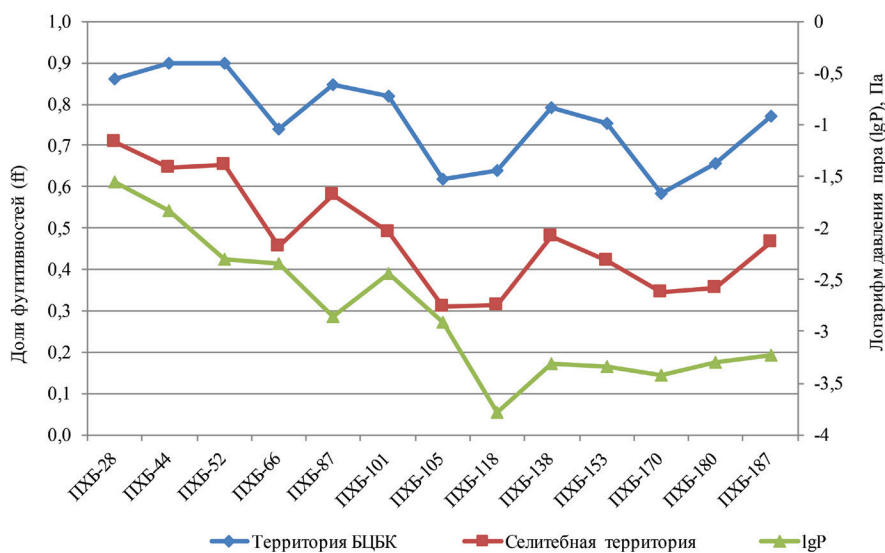


Рис. 7. Сравнение средних значений долей фугитивности (ff) и давления пара (P) для конгенов ПХБ.

Fig. 7. Comparison of the average values of the fractions of fugacity (ff) and vapor pressure (P) for PCB congeners.

поскольку при прочих равных условиях давление пара конгенов ПХБ снижается примерно на порядок с появлением дополнительного атома хлора в молекуле (табл. 1, рис. 7). Коэффициенты корреляции между средними значениями долей фугитивности и давления пара для конгенов ПХБ разной степени хлорирования для территории БЦБК и селитебной территории г. Байкальска составили, соответственно, $r = 0,50$ и $0,67$.

Сезонный характер распределения и переноса конгенов ПХБ в системе почва–атмосфера. Для оценки сезонного фактора проведены расчеты долей фугитивности для зимнего, весеннего, летнего и осеннего сезонов 2021–2022 гг. с использованием концентраций ПХБ в воздухе, измеренных в эти периоды, и концентраций ПХБ в почве, измеренных летом 2021–2023 гг.

Учитывая стойкость к окружающей среде, концентрации ПХБ в почве за период исследований могут быть приняты неизменными. Это предположение было подтверждено недавними исследованиями авторов [44], в которых ежемесячно измерялись концентрации ПХБ в почве в регионе Измир (Турция) в течение одного года и сообщаемый о стандартных отклонениях в размере около 30 % для ПХБ.

Из полученных результатов следует (рис. 8), что для всех конгенов ПХБ в течение года преобладает испарение с поверхности земли (65 % от общего числа проб), тенденция к осаждению ПХБ из атмосферы наблюдалась в 15 % случаев, в 20 % случаев ПХБ находились в состоянии равновесия. В теплый период года с апреля по октябрь результаты расчетов демонстрируют доминирование

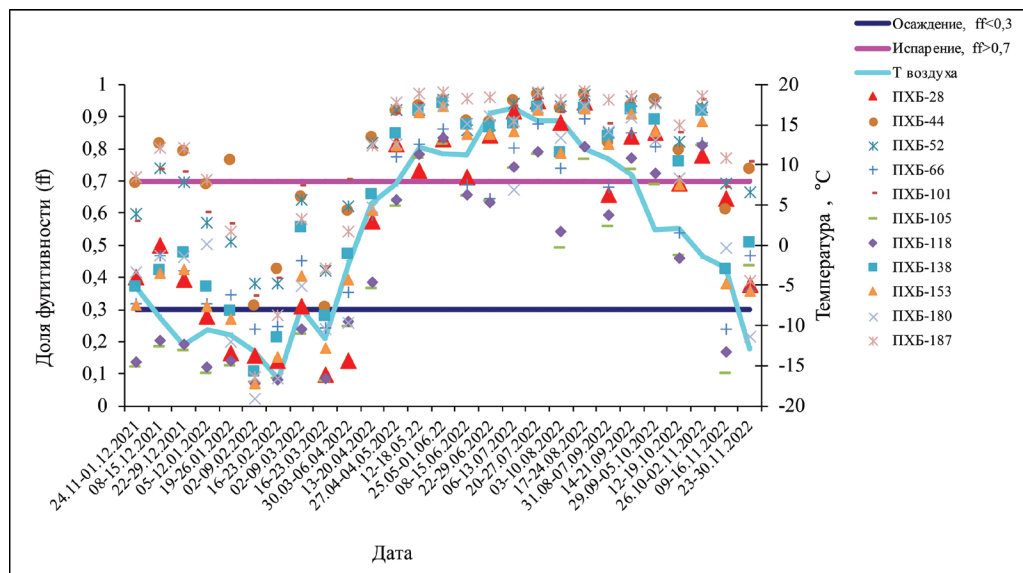


Рис. 8. Внутригодовая изменчивость долей фугитивности конгенов ПХБ на МС Байкальск за период наблюдений 2021—2022 гг.

Fig. 8. Intra-annual variability of the proportion of fugitivity of PCB congeners at MS Baikalsk during the observation period 2021—2022.

процессов испарения (93,4 % от общего числа проб), в оставшихся случаях состояние системы близко к равновесию. Значения долей фугитивности, характерные для осаждения в теплый период года, не наблюдаются. С наступлением отрицательных температур и установлением снежного покрова на поверхности земли система переходит в состояние равновесия или происходит осаждение ПХБ из атмосферы на подстилающую поверхность.

Проведенные расчеты подтверждают, что низкохлорированные конгены ПХБ (например, ПХБ-28 и ПХБ-52) проявляют большую склонность к испарению по сравнению с более тяжелыми (например, ПХБ-153 и ПХБ-180) (рис. 8).

Полученные результаты свидетельствуют о продолжающемся поступлении ПХБ в атмосферный воздух, несмотря на прекращение функционирования БЦБК в 2013 г. Процесс испарения ПХБ с поверхности почвы наиболее интенсивно происходит в весенний, летний и осенний периоды при положительных температурах окружающей среды.

Заключение

На основе данных мониторинга ПХБ в почве и атмосферном воздухе в 2021—2023 гг. установлены направления потоков переноса ПХБ в системе почва–атмосфера. Для всех рассматриваемых конгенов ПХБ в течение года преобладает испарение с поверхности почвы (65 % от общего числа проб воздуха).

Кроме этого, загрязнение воздуха ПХБ имеет выраженный сезонный характер. В теплый период года с апреля по октябрь результаты расчетов демонстрируют доминирование процессов испарения (93,4 % от общего числа проб воздуха) ПХБ из почвы, в холодный период состояние системы близко к равновесию. Значения долей фугитивности, характерные для осаждения в теплый период года, зимой не наблюдаются.

Обнаружен и исследован неорганизованный источник загрязнения окружающей среды ПХБ в районе г. Байкальска, расположенный вокруг территории промплощадки ныне не действующего БЦБК, а также установлены локальные участки с повышенными уровнями содержания ПХБ в районах полигонов отходов.

С использованием статистических методов и концепции фугитивности оценены географическое положение и пространственные размеры территории, являющейся источником поступления ПХБ в атмосферный воздух. Площадь территории и плотность загрязнения поверхности почвы ПХБ на ней, составили 2,7 км² и 0,013 г/м², соответственно.

Список литературы

1. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2020 году». Иркутск: ФГБУН Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2021. 360 с.
2. Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/901821036> (дата обращения: 22.03.2024).
3. Wang D. G., Yang M., Jia H. L. et al. Levels, distributions and profiles of polychlorinated biphenyls in surface soils of Dalian, China // *Chemosphere*. 2008. Vol. 73. P. 38—42. doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.05.055.
4. Кузьмин М. И., Тарасова Е. Н., Мамонтова Е. А. и др. Воздействие сточных вод и атмосферных выбросов Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) на озеро Байкал // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2013. Вып. 28. С. 51—57.
5. Cousins I. T., Jones K. C. Air—soil exchange of semi—volatile organic compounds (SOCs) in the UK // *Environmental Pollution*. 1998. Vol. 102. P. 105—118. doi: 10.1016/S0269-7491(98)00069-4.
6. Lee R. M., Hung H., Mackay D., Jones K. C. Measurement and modeling of the diurnal cycling of atmospheric PCBs and PAHs // *Environmental Science and Technology*. 1998. Vol. 32. P. 2172—2179. doi: 10.1021/es980028z.
7. Sweetman A. J., Jones K. C. Declining PCB concentrations in the UK atmosphere: evidence and possible causes // *Environmental Science and Technology*. 2000. Vol. 34. P. 863—869. doi: 10.1021/es9906296.
8. Cousins I. T., Beck A. J., Jones K. C. A review of the processes involved in the exchange of semi—volatile organic compounds (SVOC) across the air—soil interface // *Science of the Total Environment*. 1999. Vol. 228. P. 5—24. doi: 10.1016/S0048-9697(99)00015-7.
9. Hippelein M., McLachlan M.S. Soil/Air partitioning of semi—volatile organic compounds. 2. Influence of temperature and relative humidity // *Environmental Science and Technology*. 2000. Vol. 34. P. 3521—3526. doi: 10.1021/es991421n.
10. Grundy S. L., Bright D. A., Dushenko W. T., Reimer K. J. Weathering and dispersal of polychlorinated biphenyls from a known source in the Canadian Arctic // *Environmental Science and Technology*. 1996. Vol. 30. P. 2661—2666. doi: 10.1021/es9504931.
11. Байкаловедение. Книга 1. Новосибирск: Наука, 2012. 466 с.
12. Белозерова И. А., Владимиров И. Н., Убугунова В. И. и др. Почвы водоохранной зоны озера Байкал и их использование // *География и природные ресурсы*. 2016. Вып. 5. С. 70—82.
13. EPA Method 8082A. Polychlorinated biphenyls (PCBs) by gas chromatography. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/8082a.pdf> (дата обращения: 22.03.2024).

14. Mackay D, Shiu W. Y., Ma K.-C., Lee S. C. Handbook of physical—chemical properties and environmental fate for organic chemicals. 2—nd ed. 2006. 1343 p. doi:10.1201/9781420044393.
15. Li N., Wania F., Lei Y. D., Daly G. L. A comprehensive and critical compilation, evaluation, and selection of physical—chemical property data for selected polychlorinated biphenyls // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 2003. Vol. 32. P. 1545—1590. doi: 10.1063/1.1562632.
16. Kömp P., McLachlan M.S. Interspecies variability of the plant/air partitioning of polychlorinated biphenyls // *Environmental Science and Technology*. 1997. Vol. 31. P. 2944—2948. doi: 10.1021/es970141+.
17. Harner T., Bidleman T.F. Measurements of octanol-air partition coefficients for polychlorinated biphenyls // *Journal of Chemical and Engineering Data*. 1996. Vol. 41. P. 895—899. doi: 10.1021/je960097y.
18. Chen J., Xue X., Schramm K.-W. et al. Quantitative structure—property relationships for octanol—air partition coefficients of polychlorinated biphenyls // *Chemosphere*. 2002. Vol. 48. P. 535—544. doi: 10.1016/S0045-6535(02)00103-0.
19. Burkhard L. P., Armstrong D. E., Andren A. W. Henry's law constants for the polychlorinated biphenyls // *Environmental Science and Technology*. 1985. Vol. 19. P. 590—596. doi: 10.1021/es00137a002.
20. Запечалов М. А., Левшин Д. Г., Лукьянова Н. Н. и др. Загрязнение почв и сопредельных сред прибрежной зоны Южного Байкала токсичными химическими веществами // *Метеорология и гидрология*. 2023. Вып. 4. С. 66—76. doi: 10.52002/0130-2906-2023-4-66-76.
21. Parnis J., Mackay D. Multimedia environmental models: The fugacity approach. Third edition. Publishing House of Boca Raton, 2020. 301 p. doi: 10.1201/9780367809829.
22. Li Y.F., Harner T., Liu L. et al. Polychlorinated biphenyls in global air and soil: distributions, air—soil exchange, and fractionation effect // *Environmental Science and Technology*. 2010. Vol. 44. P. 2784—2790. doi: 10.1021/es901871e.
23. Harner T., Bidleman T. F., Jantunen L. M. M., Mackay D. Soil-air exchange model of persistent pesticides in the US cotton belt // *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2001. Vol. 20. P. 1612—1621. doi: 10.1002/etc.5620200728.
24. Ruzickova P., Klanova J., Cupr P. et al. An assessment of air-soil exchange of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides across Central and Southern Europe // *Environmental Science and Technology*. 2008. Vol. 42. P. 179—185. doi: 10.1021/es071406f.
25. Koblizkova M., Ruzickova P., Cupr P. et al. Soil burdens of persistent organic pollutants: their levels, fate, and risks. Part IV. Quantification of volatilization fluxes of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls from contaminated soil surfaces // *Environmental Science and Technology*. 2009. Vol. 43. P. 3588—3595. doi: 10.1021/es9003944.
26. Meijer S. N., Ockenden W. A., Sweetman A. J. et al. Global distribution and budget of PCBs and HCB in background surface soils: implications for sources and environmental processes // *Environmental Science and Technology*. 2003. Vol. 37. P. 667—672. doi: 10.1021/es025809l.
27. Bidleman T. F., Leone A. D. Soil-air exchange of organochlorine pesticides in the Southern United States // *Environmental Pollution*. 2004. Vol. 128. P. 49—57. doi: 10.1016/j.envpol.2003.08.034.
28. Karickhoff S. W. Semi-empirical estimation of sorption of hydrophobic pollutants on natural sediments and soils // *Chemosphere*. 1981. Vol. 10. P. 833—846. doi: 10.1016/0045-6535(81)90083-7.
29. Hippelein M., McLachlan M. S. Soil-air partitioning of semivolatile organic compounds. 1. Method development and influence of physicochemical properties // *Environmental Science and Technology*. 1998. Vol. 32. P. 310—316. doi: 10.1021/es9705699.
30. Wania F., Haugen J-E., Mackay D. Temperature Dependence of Atmospheric Concentrations of Semivolatile Organic Compounds // *Environmental Science and Technology*. 1998. Vol. 32, №8. P. 1013—1021. doi: 10.1021/es970856c.
31. Самсонов Д. П., Кочетков А. И., Пасынкова Е. П., Запечалов М. А. Содержание стойких органических загрязнителей в компонентах уникальной экологической системы озера Байкал // *Метеорология и гидрология*. 2017. Вып. 5. С. 105—115.
32. Mamontova E. A., Mamontov A. A. Air Monitoring of Polychlorinated Biphenyls and Organochlorine Pesticides in Eastern Siberia: Levels, Temporal Trends, and Risk Assessment // *Atmosphere*. 2022. Vol. 13. P. 1—26. doi:10.3390/atmos13121971.
33. Запечалов М. А., Самсонов Д. П., Кочетков А. И. и др. Глобальный атмосферный перенос стойких органических загрязнителей в Арктическую зону Российской Федерации // *Метеорология и гидрология*. 2020. Вып. 9. С. 90—103.

34. Официальный сайт Байкальского муниципального образования Слюдянского района Иркутской области. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gorod-baikalsk.ru/industry-html> (дата обращения: 22.03.2024).
35. Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 22.03.2024).
36. Mamontov A., Mamontova E., Tarasova E. et al. Persistent organic pollutants in soil and snow from the Lake Baikal Region, Russia // *Organohalogen compounds*. 2004. Vol. 66. P. 1327—1332.
37. Dumanoglu Y., Altiock H., Kara M., Elbir T. Spatial and temporal variation and air—soil exchange of atmospheric PAHs and PCBs in an industrial region // *Atmospheric Pollution Research*. 2012. Vol. 3. P. 435—449. doi: 10.5094/APR.2012.050.
38. Кухарчик Т. И. Полихлорированные бифенилы в Беларуси. Минск: Минсктиппроект, 2006. 264 с.
39. Агапкина Г. И., Ефименко Е. С., Бродский Е. С. и др. Содержание и распределение полихлорированных бифенилов в почвах Москвы // *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*. 2011. Вып. 1. С. 39—45.
40. Полихлорированные бифенилы (ПХБ) в Байкальском регионе: источники, дальний перенос и оценка риска (результаты гранта INTAS 2000-00140). Иркутск: Издательство ИГ СО РАН. 2005. 52 с.
41. Zhao X., Zheng M., Zhang B. et al. Evidence for the transfer of polychlorinated biphenyls, polychlorinated dibenzo—p—dioxins and polychlorinated dibenzofurans from soil into biota // *The Science of Total Environment*. 2006. Vol. 368. №2—3. P. 744—752. doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.02.027.
42. Мамонтова Е. А., Тарасова Е. Н., Левшина С. И. и др. Полихлорированные бифенилы и хлороорганические пестициды в системе атмосферный воздух—почва на юге Дальнего Востока России // *Метеорология и гидрология*. 2014. Вып. 11. С. 45—55.
43. Leeuwen C. J., Hermens J. L. M. Risk Assessment of Chemicals: an Introduction. Publishing House of Kluwer Academic. 1995. 374 p. doi: 10.1007/978-1-4020-6102-8.
44. Odabasi M. Department of Environmental Engineering, Dokuz Eylul University, Izmir, Turkey. 2012. Unpublished results.

References

1. The State report «*O sostoyanii ozera Baykal i mery po yego okhrane v 2020 godu*» = «*On the state of Lake Baikal and measures for its protection in 2020*». Irkutsk: V. B. Sochava Institute of Geography of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2021: 360 p. (In Russ.).
2. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/901821036> (accessed on: 22.03.2024).
3. Wang D. G., Yang M., Jia H. L. et al. Levels, distributions and profiles of polychlorinated biphenyls in surface soils of Dalian, China. *Chemosphere*. 2008; (73): 38—42. doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.05.055.
4. Kuzmin M. I., Tarasova E. N., Mamontova E. A., et al. The impact of sewage and atmospheric emissions of Baikal'sk pulp and paper mill (PPPM) on lake Baikal. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2013; (28): (51—57). (In Russ.).
5. Cousins I. T., Jones K. C. Air-soil exchange of semi-volatile organic compounds (SOCs) in the UK. *Environmental Pollution*. 1998; (102): 105—118. doi: 10.1016/S0269-7491(98)00069-4.
6. Lee R. M., Hung H., Mackay D., Jones K.C. Measurement and modeling of the diurnal cycling of atmospheric PCBs and PAHs. *Environmental Science and Technology*. 1998; (32): 2172—2179. doi: 10.1021/es980028z.
7. Sweetman A. J., Jones K. C. Declining PCB concentrations in the UK atmosphere: evidence and possible causes. *Environmental Science and Technology*. 2000; (34): 863—869. doi: 10.1021/es9906296.
8. Cousins I. T., Beck A. J., Jones K. C. A review of the processes involved in the exchange of semi-volatile organic compounds (SVOC) across the air-soil interface. *Science of the Total Environment*. 1999; (228): 5—24. doi: 10.1016/S0048-9697(99)00015-7.

9. Hippelein M., McLachlan M. S. Soil/Air partitioning of semi-volatile organic compounds. 2. Influence of temperature and relative humidity. *Environmental Science and Technology*. 2000; (34): 3521—3526. doi: 10.1021/es991421n.
10. Grundy S. L., Bright D. A., Dushenko W. T., Reimer K. J. Weathering and dispersal of polychlorinated biphenyls from a known source in the Canadian Arctic. *Environmental Science and Technology*. 1996; (30): 2661—2666. doi: 10.1021/es950493l.
11. *Baykalovedeniye. Kniga 1 = Baicalogy. Book 1*. Novosibirsk: Science, 2012; 466 p. (In Russ.).
12. Belozerova I. A., Vladimirov I. N., Ubugunova V. I. et al. Soils of the water protection zone of Lake Baikal and their use. *Geografiya i prirodnyye resursy = Geography and natural resources*. 2016; (5): (70—82). (In Russ.).
13. EPA Method 8082A. Polychlorinated biphenyls (PCBs) by gas chromatography. Available at: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/8082a.pdf> (accessed on: 22.03.2024).
14. Mackay D, Shiu W. Y., Ma K.-C., Lee S. C. Handbook of physical-chemical properties and environmental fate for organic chemicals. 2-nd ed. 2006; 1343 p. doi:10.1201/9781420044393.
15. Li N., Wania F., Lei Y. D., Daly G. L. A comprehensive and critical compilation, evaluation, and selection of physical—chemical property data for selected polychlorinated biphenyls. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 2003; (32): 1545—1590. doi: 10.1063/1.1562632.
16. Kömp P., McLachlan M. S. Interspecies variability of the plant/air partitioning of polychlorinated biphenyls. *Environmental Science and Technology*. 1997; (31): 2944—2948. doi: 10.1021/es970141+.
17. Harner T., Bidleman T. F. Measurements of octanol-air partition coefficients for polychlorinated biphenyls. *Journal of Chemical and Engineering Data*. 1996; (41): 895—899. doi: 10.1021/jc960097y.
18. Chen J., Xue X., Schramm K.-W. et al. Quantitative structure—property relationships for octanol—air partition coefficients of polychlorinated biphenyls. *Chemosphere*. 2002; (48): 535—544. doi: 10.1016/S0045-6535(02)00103-0.
19. Burkhard L. P., Armstrong D. E., Andren A. W. Henry's law constants for the polychlorinated biphenyls. *Environmental Science and Technology*. 1985; (19): 590—596. doi: 10.1021/es00137a002.
20. Zapevalov M. A., Levshin D. G., Luk'yanova N. N. et al. Pollution of soils and adjacent environments of the coastal zone of Southern Baikal with toxic chemicals. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2023; (4): (66—76). (In Russ.). doi: 10.52002/0130-2906-2023-4-66-76.
21. Parnis J., Mackay D. *Multimedia environmental models: The fugacity approach. Third edition*. Publishing House of Boca Raton. 2020; 301 p. doi: 10.1201/9780367809829.
22. Li Y. F., Harner T., Liu L. et al. Polychlorinated biphenyls in global air and soil: distributions, air—soil exchange, and fractionation effect. *Environmental Science and Technology*. 2010; (44): 2784—2790. doi: 10.1021/es901871e.
23. Harner T., Bidleman T. F., Jantunen L. M. M., Mackay D. Soil—air exchange model of persistent pesticides in the US cotton belt. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2001; (20): 1612—1621. doi: 10.1002/etc.5620200728.
24. Ruzickova P., Klanova J., Cupr P. et al. An assessment of air-soil exchange of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides across Central and Southern Europe. *Environmental Science and Technology*. 2008; (42): 179—185. doi: 10.1021/es071406f.
25. Koblizkova M., Ruzickova P., Cupr P. et al. Soil burdens of persistent organic pollutants: their levels, fate, and risks. Part IV. Quantification of volatilization fluxes of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls from contaminated soil surfaces. *Environmental Science and Technology*. 2009; (43): 3588—3595. doi: 10.1021/es9003944.
26. Meijer S. N., Ockenden W. A., Sweetman A. J. et al. Global distribution and budget of PCBs and HCB in background surface soils: implications for sources and environmental processes. *Environmental Science and Technology*. 2003; (37): 667—672. doi: 10.1021/es025809l.
27. Bidleman T. F., Leone A. D. Soil-air exchange of organochlorine pesticides in the Southern United States. *Environmental Pollution*. 2004; (128): 49—57. doi: 10.1016/j.envpol.2003.08.034.
28. Karickhoff S. W. Semi-empirical estimation of sorption of hydrophobic pollutants on natural sediments and soils. *Chemosphere*. 1981; (10): 833—846. doi: 10.1016/0045-6535(81)90083-7.
29. Hippelein M., McLachlan M. S. Soil—air partitioning of semivolatile organic compounds. 1. Method development and influence of physicochemical properties. *Environmental Science and Technology*. 1998; (32): 310—316. doi: 10.1021/es9705699.

30. Wania F., Haugen J-E., Mackay D. Temperature Dependence of Atmospheric Concentrations of Semi-volatile Organic Compounds. *Environmental Science and Technology*. 1998; 32(8): 1013—1021. doi: 10.1021/es970856c.
31. Samsonov D. P., Kochetkov A. I., Pasyukova E. P., Zapevalov M. A. Content of persistent organic pollutants in the components of the unique ecological system of Lake Baikal. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2017; (5): (105—115). (In Russ.).
32. Mamontova E. A., Mamontov A. A. Air Monitoring of Polychlorinated Biphenyls and Organochlorine Pesticides in Eastern Siberia: Levels, Temporal Trends, and Risk Assessment. *Atmosphere*. 2022; (13): 1—26. doi: 10.3390/atmos13121971.
33. Zapevalov M. A., Samsonov D.P., Kochetkov A.I. et al. Global atmospheric transport of persistent organic pollutants to the Arctic zone of the Russian Federation. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2020; (9): (90—103). (In Russ.).
34. Official website of the Baikal municipal formation of the Slyudyansky district of the Irkutsk region. Available at: <https://gorod-baikalsk.ru/industry-html> (accessed on: 22.03.2024).
35. On approval of sanitary rules and norms SanPiN 1.2.3685-21 “Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors to humans”. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (accessed on: 22.03.2024).
36. Mamontov A., Mamontova E., Tarasova E. et al. Persistent organic pollutants in soil and snow from the Lake Baikal Region, Russia. *Organohalogen compounds*. 2004; (66): 1327—1332.
37. Dumanoglu Y., Altioek H., Kara M., Elbir T. Spatial and temporal variation and air—soil exchange of atmospheric PAHs and PCBs in an industrial region. *Atmospheric Pollution Research*. 2012; (3): 435—449. doi: 10.5094/APR.2012.050.
38. Kukharchik T. I. *Polikhlorirovannyye bifenyly v Belarusi = Polychlorinated biphenyls in Belarus*. Minsk: Minsktippprojekt, 2006; 264 p. (In Russ.).
39. Agapkina G. I., Yefimenko Ye. S., Brodskiy Ye. S. et al. Content and distribution of polychlorinated biphenyls in Moscow soils. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedeniye = Bulletin of Moscow University. Episode 17. Soil science*. 2011; (1): (39—45). (In Russ.).
40. *Polikhlorirovannyye bifenyly (PKHB) v Baykal'skom regione: istochniki, dal'niy perenos i otsenka riska (rezul'taty granta INTAS 2000-00140) = Polychlorinated biphenyls (PCBs) in the Baikal region: sources, long-range transport and risk assessment (results of grant INTAS 2000-00140)*. Irkutsk: Publishing House IG SO RAN, 2005; 52 p. (In Russ.).
41. Zhao X., Zheng M., Zhang B. et al. Evidence for the transfer of polychlorinated biphenyls, polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans from soil into biota. *The Science of Total Environment*. 2006; 368(2—3): 744—752. doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.02.027.
42. Mamontova E. A., Tarasova E. N., Levshina S. I. et al. Polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in the atmospheric air-soil system in the south of the Russian Far East. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2014; (11): (45—55). (In Russ.).
43. Leeuwen C. J., Hermens J. L. M. Risk Assessment of Chemicals: an Introduction. *Publishing House of Kluwer Academic*, 1995; 374 p. doi: 10.1007/978-1-4020-6102-8.
44. Odabasi M. Department of Environmental Engineering, *Dokuz Eylul University, Izmir, Turkey*. 2012; Unpublished results.

Информация об авторах

Левшин Дмитрий Геннадьевич, научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-производственное объединение «Тайфун», Институт проблем мониторинга (ИПМ) окружающей среды, levshin@rpatyphoon.ru.

Запезалов Михаил Алексеевич, кандидат химических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-производственное объединение «Тайфун», Институт проблем мониторинга (ИПМ) окружающей среды, заместитель директора, zapevalow@mail.ru.

Бурков Антон Игоревич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-производственное объединение «Тайфун», Федеральный информационно-аналитический центр Росгидромета, burkov@rpatyphoon.ru.

Information about authors

Dmitry G. Levshin, researcher, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring Research and Production Association “Typhoon”, Institute for Environmental Monitoring Problems (IPM).

Mikhail A. Zapevalov, candidate of Chemical Sciences, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring Research and Production Association “Typhoon”, Institute for Environmental Monitoring Problems (IPM), Deputy Director IPM.

Anton I. Burkov, candidate of Science in Physics and Mathematics, senior researcher, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring Research and Production Association “Typhoon”, Federal Information and Analytical Center of Roshydromet.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 30.05.2024

Принята после доработки в печать 22.10.2024

The article was received on 30.05.2024

The article was accepted after revision on 22.10.2024