

Полихлорированные бифенилы в атмосферном воздухе города Байкальска: возможные источники поступления и влияющие факторы

Д.Г. Левшин, М.А. Запезалов, А.И. Бурков*

ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун»,
РФ, 249038, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Победы, 4

*Адрес для переписки: levshin@rpatyphoon.ru

Реферат. Представлены результаты мониторинга содержания полихлорированных бифенилов (ПХБ) в атмосферном воздухе г. Байкальска в 2022-2024 гг. Исследована зависимость давления пара ПХБ в воздухе от температуры почвы с использованием графиков зависимости ($\ln P \sim 1/T$). На основе равновесной термодинамической модели показано, что в холодный период года концентрации ПХБ в атмосфере формируются за счет адвективного переноса загрязненных воздушных масс от источников на существенном удалении от места отбора проб. В теплый период основным источником поступления ПХБ в атмосферу является поверхность почвы, загрязненная бифенилами.

Ключевые слова. Байкал, бифенилы (ПХБ), атмосферный воздух, концентрации, температура, уравнение Клапейрона-Клаузиуса.

Polychlorinated biphenyls in ambient air of Baikalsk town: possible sources and controlling factors

D.G. Levshin, M.A. Zapevalov, A.I. Burkov*

Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring
Research and Production Association "Typhoon"
4, Pobeda street, Kaluga region, 249038, Russian Federation

*Correspondence address: levshin@rpatyphoon.ru

Abstract. The results of monitoring the content of polychlorinated biphenyls (PCBs) in the ambient air of Baikalsk in 2022-2024 are presented. The dependence vapor pressure of PCB in the air on soil temperature was studied using dependence graphs ($\ln P \sim 1/T$). Based on the equilibrium thermodynamic model it is shown, that during the cold season, PCBs concentrations in the atmosphere are formed due to advective transport of contaminated air masses from sources at a significant distance from the sampling site. In warm period, the main source of PCBs entering the atmosphere is the soil surface contaminated with biphenyls.

Keywords. Baikal, biphenyls (PCBs), ambient air, concentrations, temperature, Clapeyron-Clausius equation.

Введение

Формирование концентраций стойких органических загрязнителей (СОЗ) в атмосферном воздухе происходит двумя основными путями: 1) за счет переноса от удаленных источников (дальний перенос) и 2) поступление от локальных источников, расположенных в непосредственной близости, либо на самой обследуемой территории. Оценка вклада источников поступления имеет принципиальное значение для понимания причин и факторов сложившейся экологической ситуации и осуществления мероприятий по снижению неблагоприятного воздействия СОЗ на окружающую среду.

Один из возможных путей оценки вклада поступления от удаленных и от локальных источников СОЗ – изучение статистических и функциональных связей данных мониторинга с влияющими факторами окружающей среды на основе представлений о процессах переноса в системе. Преимуществом подхода, основанного на анализе данных регулярных наблюдений содержания СОЗ в окружающей среде, является наличие достаточно длинных по времени рядов измерений, которые отражают влияние всех возможных источников и факторов, к которым можно применять как методы статистической обработки, так и методы моделирования. Модели, прошедшие настройку на основе данных наблюдений и хорошо зарекомендовавшие себя в описании поведения системы, могут стать надежным инструментом для принятия управленческих решений (Ashworth et al., 2013).

В настоящей работе мы попытались оценить вклады локальных и удаленных источников загрязнения атмосферы одной из приоритетных групп СОЗ – полихлорированных бифенилов в г. Байкальске Иркутской области.

ПХБ целенаправленно производились и продавались в виде технических смесей с различной степенью хлорирования, в основном до 1980-х годов, частично до 1990-х годов (например, в России). Из 209 конгенов ПХБ около 130 были обнаружены в технических смесях (Megson et al., 2019).

Во всем мире ПХБ широко использовались в замкнутых системах (в трансформаторах, конденсаторах и другом электрооборудовании) в качестве изоляционных материалов и теплообменных жидкостей, а также в контакте с окружающей средой в качестве смазочных масел, компонентов красок, пластификаторов и др. Общее количество произведенных в мире ПХБ оценивается в 1.2 млн. тонн, из которых по экспертным оценкам 35% поступили в окружающую среду (Приказ Госкомэкологии..., 1999). ПХБ также могут непреднамеренно образовываться в качестве побочных продуктов термических процессов (DIN EN 1948-4, 2014).

Несмотря на запрет производства ПХБ, накопленные запасы этих токсичных смесей остаются значительными и подлежат ликвидации. Стокгольмская конвенция о СОЗ предусматривает вывод из эксплуатации ПХБ-содержащего оборудования в 2025 году и уничтожение запасов ПХБ к 2028 году (UNEP/POPS/COP.12/INF/11, 2025).

В связи с прекращением производства ПХБ в 1990-х годах вторичная эмиссия с поверхности земли превращается в значимый источник поступле-

ния ПХБ в атмосферу. При этом в роли основного регулятора процесса испарения–осаждения ПХБ выступает температура окружающей среды (Wania et al., 1998; Halsall et al., 1999).

Анализ климатических изменений в бассейне озера Байкал показывает устойчивую тенденцию к росту среднегодовой и сезонной температуры с трендом около $0.3\text{--}0.4^{\circ}\text{C}/10$ лет (Липка и др., 2024). При этом по некоторым данным (Морозова и др., 2025), основанным на анализе спутниковых наблюдений, наиболее значительный рост наблюдается после 2014 г. На территориях, прилегающих к оз. Байкал (расстояние 5 и 10 км), температура в этот период локально увеличивалась на 1.68°C и 1.64°C соответственно (Морозова и др., 2025). Можно предположить, что по мере повышения температуры концентрации ПХБ в воздухе будут увеличиваться в результате роста их испарения с загрязненной поверхности земли.

В настоящей работе была исследована количественная связь между наблюдаемыми по результатам регулярного мониторинга концентрациями ПХБ в атмосфере и характеристиками окружающей среды.

Район, объекты и методы исследования

Местоположение объекта

Байкальск – моногород, основанный в 1961 г. в связи со строительством целлюлозно-бумажного комбината. Город расположен на южном побережье озера Байкала, в устье рек Солзан и Харлахта в 140 км к юго-востоку от областного центра – г. Иркутска. Более 50 лет градообразующим предприятием был Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат (БЦБК). С 2013 г. комбинат прекратил свою деятельность, однако на территории промплощадки бывшего БЦБК до настоящего времени расположены канализационно-очистные сооружения и производственные помещения, являющиеся объектами накопленного вреда. В настоящее время продолжает работу только теплоэлектростанция (ТЭЦ), снабжающая большую часть населения теплом и горячим водоснабжением.

Выбор района обследования обусловлен тем, что проблема загрязнения СОЗ Байкальской природной территории в связи с функционированием БЦБК давно известна (Кузьмин и др., 2013), однако ситуация с источниками ПХБ остается не до конца понятной.

Проведенные нами ранее исследования уровней загрязнения почвы и воздуха в Байкальске и прилегающих территориях (Левшин и др., 2024) показали, что вокруг промплощадки БЦБК на территории около 2.7 км^2 сложились повышенные уровни концентраций ПХБ в почве, такие что в теплый период года эта территория является площадным локальным неорганизованным источником загрязнения атмосферы.

Отбор и анализ ПХБ в пробах атмосферного воздуха

Регулярный отбор проб воздуха в г. Байкальске проводится с конца 2021 года в рамках реализации Федерального проекта «Сохранение озера Байкал» национального проекта «Экология».

Для улавливания паров и аэрозолей ПХБ использовали метод активного пробоотбора с помощью воздухофилтующей установки (ВФУ) МР-48-01. ВФУ размещена на метеорологической станции в г. Байкальске (51.5156°с. ш., 104.17475°в. д.).

Отбор аэрозольной фракции проводится на высокоэффективные стекловолокнистые фильтры TFAGF-41 (эффективность 99.7% по аэрозолю 0.3 мкм). Для улавливания паров токсикантов используется специально подготовленный сорбент из высокочистого пенополиуретана (PUF). Толщина слоя сорбента 100 мм. Для контроля проскока аналитов при отборе пробы, на сорбент PUF наносится раствор изотопно-меченых по углероду C^{13} аналогов аналитов. Продолжительность отбора одной пробы – не менее 7 суток, объем пропущенного воздуха составляет 4000-5000 м³. Параллельно с отбором проб выполняются метеорологические наблюдения, такие как измерения температуры воздуха и почвы, скорости и направления ветра.

В настоящей работе рассматриваются результаты мониторинга атмосферного воздуха в период с 2022 по 2024 гг. Всего за это время было отобрано и проанализировано 65 проб воздуха.

Анализ образцов проводится методами хромато-масс-спектрометрии высокого разрешения. Отдельно измерялось содержание токсикантов в аэрозольной и газовой фракциях. Анализируемые компоненты извлекаются с использованием метода экстракции н-гексаном и хлористым метиленом в аппарате Сокслета. Экстракты освобождаются от следов воды безводным сульфатом натрия и очищаются от мешающих примесей в несколько стадий методом колоночной хроматографии (ГОСТ Р ИСО 16000-14, 2013) с модифицированным силикагелем, и с активированным Al_2O_3 , с последующим концентрированием целевой фракции, внесением внутреннего стандарта ПХБ-155, и проведением инструментального анализа на хромато-масс-спектрометре высокого разрешения Agilent 7200 Q-TOF при ионизации электронами. Разделение аналитов проводится в режиме программирования температуры на кварцевой капиллярной колонке DB-5MS длиной 30 м, диаметром 0.25 мм и толщиной фазы 0.25 мкм. В ходе анализа фиксируются характеристические ионы аналитов с точностью не хуже 0.003 Да. Масс-спектральное разрешение в ходе анализа $R \geq 9000$. Обработка результатов выполняется с помощью программы Agilent MassHunter. Идентификация аналитов проводится по наличию характеристических ионов и совпадению времен удерживания выделенных на масс-хроматограмме пиков с временами удерживания конгенов ПХБ, полученные при анализе контрольной смеси.

Неопределенность измерений концентраций ПХБ по методике (ГОСТ Р ИСО 16000-14, 2013) не превышает 45%.

Перечень исследованных ПХБ включал три-, тетра-, пента-, гекса- и гептахлорзамещенные конгены. Из 63 анализируемых конгенов ПХБ лишь двенадцать присутствовали во всех отобранных пробах в течение всего периода наблюдений. Физико-химические свойства подробно изученных конгенов ПХБ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-химические свойства исследованных конгенов ПХБ

Table 1. Physico-chemical properties of the studied PCB congeners

Конгенер ПХБ	CAS №	Молярная масса, г/моль	Константа Генри (К _Н), Па·м ³ /моль (Bamford et al., 2000)	Давление пара (Р), Па (Falconer and Bidleman, 1994)
	(Mackay et al., 2006)			
ПХБ-28	7012-37-5	257.543	lgH=-1821.5/T+7.6938	lgP=-4075/T+12.20
ПХБ-44	41464-39-5	291.988	lgH=-1470.7/T+6.3832	lgP=-4229/T+12.29
ПХБ-52	35693-99-3	291.988	lgH=-1721.6/T+7.2698	lgP=-4220/T+12.36
ПХБ-66	32598-10-0	291.988	lgH=-1638.7/T+7.0669	lgP=-4349/T+12.38
ПХБ-87	38380-02-8	326.433	lgH=-1822.4/T+7.6920	lgP=-4562/T+12.66
ПХБ-101	37680-73-2	326.433	lgH=-1678.7/T+7.2572	lgP=-4514/T+12.67
ПХБ-105	32598-14-4	326.433	lgH=-4074.5/T+15.1988	lgP=-4758/T+12.90
ПХБ-118	31508-00-6	326.433	lgH=-2723.9/T+10.6988	lgP=-4664/T+12.72
ПХБ-138	35065-28-2	360.878	lgH=-4678.9/T+17.3504	lgP=-4800/T+12.81
ПХБ-153	35065-27-1	360.878	lgH=-3577.3/T+13.7274	lgP=-4775/T+12.85
ПХБ-180	35065-29-3	395.323	lgH=-7626.6/T+27.1610	lgP=-5042/T+13.03
ПХБ-187	52663-68-0	395.323	lgH=-5223.8/T+19.3609	lgP=-4977/T+12.96

Определения используемых терминов

Теплый период – время отбора проб со средней температурой почвы выше 0°C. По данным гидрометеорологической службы Иркутского УГМС теплый период в Байкальске ежегодно наступает в середине апреля и продолжается до конца октября. Следует отметить, что в начале и конце теплого периода среднесуточная температура отдельных дней может опускаться ниже 0°C и сопровождаться снежными осадками, покрывающими полностью или частично поверхность почвы.

Холодный период подразумевает отрицательную температуру почвы за время пробоотбора. Для холодного периода характерен снежный покров, максимальная высота которого достигала 82 см в январе 2022 г. Холодный период продолжается с ноября до середины апреля каждого года.

Экспериментальные результаты (данные) – результаты, полученные и обработанные в ходе проведения мониторинга на обследуемой территории.

Литературные результаты (данные) – научная информация, опубликованная в печатных или электронных источниках (статьи, монографии и т. п.).

Расчетные результаты (данные) – численные значения показателей (углы наклонов линий тренда и энтальпий, исследуемых конгенов ПХБ), полученные в итоге проведения расчетов на основе приведенных в настоящей статье литературных данных и формул.

Термодинамический подход

Обмен летучими загрязняющими веществами между почвой и воздухом может быть описан с помощью термодинамического подхода, который предполагает наличие равновесного состояния газовой фазы концентраций инди-

видуальных конгенеров ПХБ между поверхностью почвы и атмосферным воздухом.

С точки зрения термодинамики фазовый переход летучих соединений между почвой и воздухом аналогичен фазовому переходу между чистой жидкой фазой химического вещества и его газообразной фазой. Для ПХБ в почве можно предположить, что происходит фазовый переход из жидкого состояния в газообразное, поскольку полагается, что частицы почвы, составляющие ее скелет, достаточно увлажнены. В физической химии это фазовое равновесие выражается уравнением Клапейрона-Клаузиуса, которое в дифференциальной форме выглядит следующим образом (Герасимов и др., 1964):

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H}{T \Delta V}, \quad (1)$$

где P – давление пара (Па), T – абсолютная температура (К), ΔH – теплота фазового превращения (Дж/моль), ΔV – изменение молярных объемов двух фаз (м³/моль).

В условиях окружающей среды, при заданных температурах и давлениях, изменение объема при испарении (жидкость–газ) принимается за приблизительное значение молярного объема газовой фазы ($\Delta V = V_{\text{ГАЗ}} - V_{\text{жидкость}} \approx V_{\text{ГАЗ}}$). Предполагается, что газовая фаза подчиняется уравнению состояния идеального газа, где $V_{\text{ГАЗ}} = RT/P$. Таким образом, уравнение (1) принимает форму уравнения (Halsall et al., 1999):

$$\frac{d \ln P}{dT} = \frac{\Delta H}{RT^2}, \quad (2)$$

где R – универсальная газовая постоянная ((Па·м³)/(моль·К)).

В случае, когда ПХБ находятся в жидкой фазе, $\Delta H = \Delta H_{\text{ГАЗ}}$ (теплота (энтальпия) парообразования), представляющая собой энергию, необходимую для преобразования одного моля жидкости в газовую фазу. При температурах окружающей среды (т.е. значительно ниже температуры кипения ПХБ) $\Delta H_{\text{ГАЗ}}$ принимается за постоянную величину и интегрирование уравнения (2) приводит к линейной зависимости (Halsall et al., 1999):

$$\ln = -\frac{m}{T} + b, \quad (3)$$

По графику зависимости $\ln P$ от $1/T$ индивидуальных конгенеров ПХБ (3) находили угол наклона m , из которого рассчитывали энтальпию $\Delta H_{\text{ГАЗ}}$:

$$m = -\frac{\Delta H_{\text{ГАЗ}}}{R}, \quad (4)$$

В дальнейшем оба параметра (m , $\Delta H_{\text{ГАЗ}}$) использовали для интерпретации данных мониторинга.

Измеренная концентрация ПХБ в воздухе (C_A , пг/м^3) в расчетах была преобразована в величину парциального давления с помощью уравнения (Герасимов и др., 1964):

$$P = \frac{C_A \times 10^{-12} \times R \times T}{M}, \quad (5)$$

где M – молярная масса (г/моль).

Экспериментальные исследования линейной зависимости $\ln P$ от $1/T$ дали основание авторам (Wania et al., 1998) предположить, что углы наклона (m) графиков уравнения Клапейрона–Клаузиуса (3), можно интерпретировать как параметр, определяющий пути поступления газовой фазы консервативных примесей в точку наблюдений. Согласно предложенному подходу (Wania et al., 1998), большие значения углов наклона указывают на то, что испарение из локальных источников доминирует над дальним переносом примесей. Физическое обоснование такого подхода состоит в том, что температура существенно больше влияет на процесс испарения ПХБ из почв, чем на их перенос с воздушными массами.

При интерпретации результатов мониторинга ПХБ в атмосферном воздухе следует учитывать, что термодинамический подход является упрощенным и имеет ряд допущений. Помимо температуры на уровни концентраций ПХБ в воздухе в конкретной местности будет влиять адвективный перенос воздушных масс на обследуемую территорию из других районов (Wania et al., 1998). Такие метеорологические параметры, как скорость и направление ветра, влажность воздуха, также играют значительную роль в формировании концентраций ПХБ в атмосфере (Burgoyne, Hites, 1993; Hornbuckle, Eisenreich, 1996).

Результаты исследований

Уровни концентраций ПХБ, годовая и сезонная изменчивость

Уровни содержания индивидуальных конгенов ПХБ, а также Σ ПХБ в атмосферном воздухе, рассчитанные по данным мониторинга в 2022-2024 гг., представлены в табл. 2.

Вклад изученных 12-и индивидуальных конгенов в сумму ПХБ составлял от 51 до 77%. В основном ПХБ содержались в газовой фракции, на долю которой в среднем приходилось 82.5%. Средняя доля индивидуальных конгенов ПХБ в газовой фазе варьировалась от 68 до 92%, причем низкохлорированные ПХБ в основном находились в газовой фракции, в то время как высокохлорированные ПХБ были в большей степени связаны с аэрозольной фракцией.

Средняя годовая концентрация Σ ПХБ за период 2022-2024 годов в районе г. Байкальска составила 301 пг/м^3 , что сопоставимо, например, с промышленным районом г. Бурса, Турция (314.7 пг/м^3) (Tasdemir et al., 2012), но на порядок ниже, чем в городах США ($1\text{-}10 \text{ нг/м}^3$) (Basra et al., 2018) и на 2-3

порядка ниже, чем в индустриальных районах Китая и Индии (от 1 до 400 нг/м³) (Zhu et al., 2022; Mohankumar et al., 2025).

Таблица 2. Сводные результаты концентраций ПХБ в атмосферном воздухе по данным мониторинга в 2022-2024 гг.

Table 2. Summary results of PCB concentrations in the ambient air according to monitoring data in 2022-2024

Конгенер ПХБ	Концентрация (газ+аэрозоль), пг/м ³			
	Минимум	Максимум	Среднее	Медиана
ПХБ-28	1.7	122	16.0	9.2
ПХБ-44	0.2	34.1	6.4	3.8
ПХБ-52	1.1	105	23.8	14.5
ПХБ-66	0.6	58.1	11.4	7.7
ПХБ-87	0.01	59.6	11.2	7.9
ПХБ-101	0.5	207	30.0	17.9
ПХБ-105	0.2	70.0	13.8	9.1
ПХБ-118	0.4	157	32.7	22.9
ПХБ-138	0.3	75.0	15.7	9.8
ПХБ-153	0.3	72.0	13.0	9.4
ПХБ-180	0.01	7.7	1.6	0.9
ПХБ-187	0.01	4.1	0.69	0.50
ΣПХБ ₇ [*]	4.8	600	133	91.0
ΣПХБ ₁₀ ^{**}	5.0	682	149	104
ΣПХБ	8.4	1373	301	208

Примечания: * – ΣПХБ₇ включает ПХБ-28, 52, 101, 118, 138, 153 и 180.

** – ΣПХБ₁₀ включает ПХБ-28, 31, 52, 101, 105, 118, 138, 153, 156 и 180.

В Российской Федерации не установлены гигиенические нормативы содержания ПХБ в атмосферном воздухе. В Республике Беларусь среднесуточные предельно допустимые концентрации ΣПХБ₇ составляют 1.0 мкг/м³ (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 25.01.2021 № 37). В Байкальске концентрации ΣПХБ₇ варьировали в диапазоне от 4.8 до 600 пг/м³ (табл. 2), так что даже максимальная измеренная концентрация примерно на четыре порядка ниже этого норматива. Несколько иная картина получится при сравнении с концентрациями, используемыми для оценки рисков от ингаляционного воздействия ПХБ для человека в США. Согласно рекомендациям Агентства по защите окружающей среды США¹⁾ концентрация ΣПХБ в воздухе не должна превышать 10 нг/м³. В Байкальске максимальная концентрация ΣПХБ примерно в семь раз меньше и составила около 1.4 нг/м³ (табл. 2). В некоторых штатах США установлены более жесткие

¹⁾ https://cfpub.epa.gov/ncea/iris2/chemicalLanding.cfm?substance_nmbr=294

контрольные уровни $\Sigma\text{ПХБ}$ в атмосфере: в штате Нью-Йорк среднегодовая концентрация 2 или 10 нг/м^3 в зависимости от степени хлорирования конгенов, в штате Массачусетс – 0.5 нг/м^3 (Basra et al., 2018). Однако и эти уровни не превышены в точках мониторинга на Байкальской природной территории (БПТ).

Отчетливо проявляется сезонный ход концентраций ПХБ. Средние концентрации $\Sigma\text{ПХБ}_7$, $\Sigma\text{ПХБ}_{10}$ и $\Sigma\text{ПХБ}$ в теплый период 2022-2024 годов были примерно в 3-4 раза выше, чем в холодный (рис. 1).

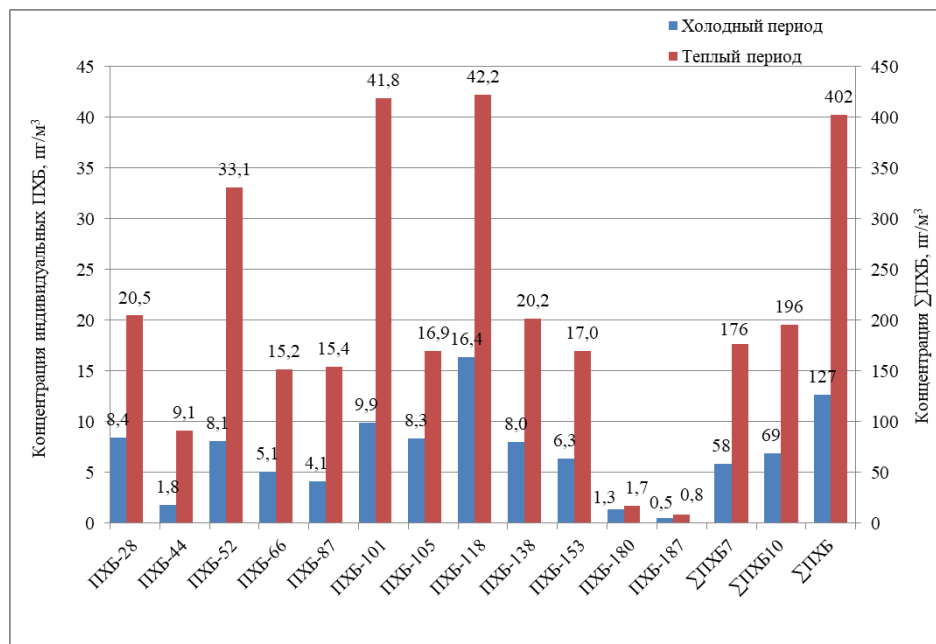


Рисунок 1. Средние концентрации различных конгенов ПХБ в холодный и теплый периоды 2022-2024 гг.

Figure 1. Average concentrations of various PCB congeners in the cold and warm periods of 2022-2024

Если говорить об изменчивости сезонных концентраций ПХБ за 2022-2024 годы, то их динамика неустойчива. Средние концентрации $\Sigma\text{ПХБ}$ в холодный период (127 пг/м^3) находились в пределах региональных фоновых значений для Азии (17.0-150 пг/м^3) и Европы (5.1-170 пг/м^3) (Li et al., 2010). Несмотря на значительно более низкие средние уровни концентраций в холодный период (диапазон варьирования от 8.4 до 355.7 пг/м^3) в семи из 24 проб воздуха (29%), отобранных в холодный период 2022-2024 гг., были зафиксированы концентрации $\Sigma\text{ПХБ}$ более 170 пг/м^3 . Среднее значение концентраций в холодный период 2022 и 2024 гг. составили 85 и 94 пг/м^3 , что практически не различимо с учетом неопределенности измерений. За аналогичный период 2023 г. средняя концентрация $\Sigma\text{ПХБ}$ возросла более чем в 2 раза и составила 243 пг/м^3 .

Изменчивость концентраций Σ ПХБ в летний период выражена существенно меньше: так в 2022 и 2024 гг. они составили 314 и 442 нг/м^3 , что коррелировало с увеличением средней температуры почвы, которая составила 13.5 и 14.7°C в 2022 и 2024 гг. соответственно. В 2023 г. средняя температура почв в теплый период составила 13.7°C и, следовательно, можно было бы предположить, что наблюдаемые концентрации Σ ПХБ должны быть на уровне аналогичного периода 2022 г. Однако в летний период 2023 г. наблюдалась самая высокая средняя концентрация Σ ПХБ, которая составила 454 нг/м^3 . Таким образом, объяснить рост средних концентраций Σ ПХБ в теплый период только за счет температурного фактора не удастся.

Детальный анализ метеоусловий для случаев повышенных концентраций ПХБ в холодный период показал отсутствие значимых корреляционных связей между уровнями концентраций и направлением ветра. Преобладающее направление ветра в холодный период – запад-юго-запад, при этом набегающий поток атмосферного воздуха поступает со стороны селитебной зоны г. Байкальска. К локальным источникам г. Байкальска в холодный период можно было бы отнести выбросы в атмосферный воздух при сжигания топлива на ТЭЦ и в частном секторе (уголь, древесина) и автотранспорт. Однако из литературных данных следует, что удельные выбросы ПХБ от этих источников обычно незначительны (ТКП 17.08-13, 2021). Таким образом, можно заключить, что антропогенная деятельность в г. Байкальск не оказывает существенного влияния на уровень загрязнения воздуха ПХБ в холодный период, следовательно, региональная фоновая концентрация в этот период формируется в результате регионального и/или трансграничного переноса воздушных масс в зоне атмосферного влияния БПТ.

Влияния температуры на уровни концентраций ПХБ в атмосферном воздухе

Полученные результаты мониторинга и многочисленные литературные данные демонстрируют, что температура окружающей среды является ключевым метеорологическим фактором, влияющим на формирование концентраций ПХБ.

Имеющиеся экспериментальные данные мониторинга подтверждают тесную взаимосвязь между концентрациями ПХБ и температурой почвы (рис. 2). Режимные наблюдения на температурой почвы ежесуточно проводятся Иркутским УГМС на МС «Байкальск». За весь срок наблюдений в периоды отбора проб воздуха температура почвы изменялась в диапазоне от -21.4 до 23.8°C.

Как уже упоминалось ранее, для описания зависимости концентраций ПХБ (газ) от температуры использовали уравнения Клапейрона–Клаузиуса (3). С этой целью рассчитывали натуральные логарифмы парциальных давлений и методом наименьших квадратов строили их линейные зависимости от обратных средних температур отдельно для теплого и холодного периодов отбора проб.

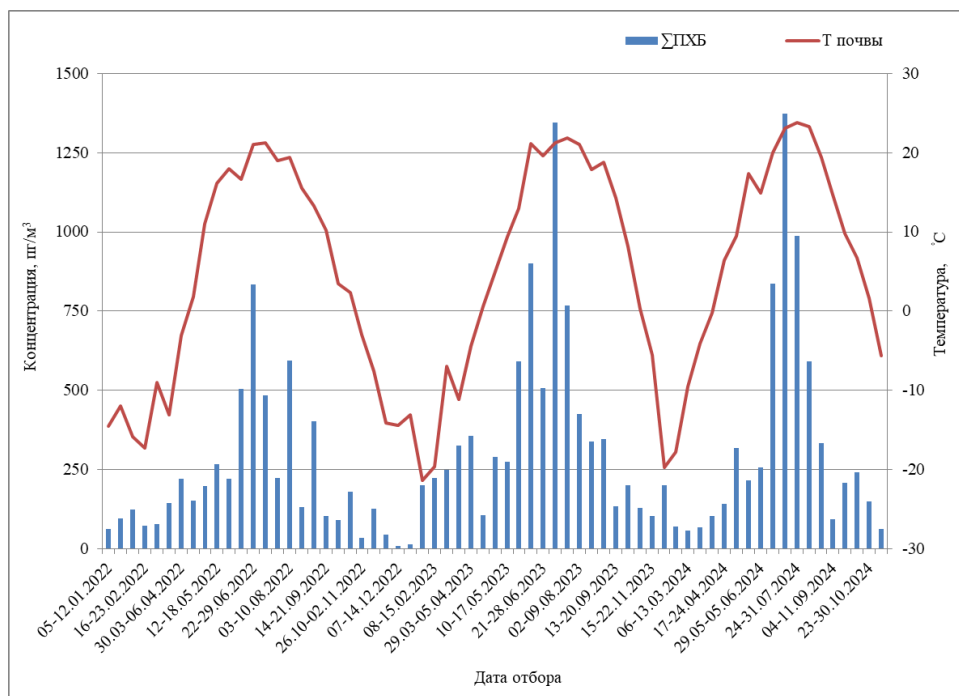


Рисунок 2. Временной ход концентраций Σ ПХБ и температуры почвы в 2022-2024 гг.

Figure 2. Time course of PCB concentrations and soil temperature in 2022-2024

Углы наклонов линий тренда $\ln P \sim 1/T$ сопоставляли с результатами расчетов других авторов. При этом необходимо учитывать, что литературные данные не всегда достаточно полно отображают все условия (отбора проб, методику анализа, метеорологические условия и другие факторы) и это вносит дополнительную неопределённость в оценке сопоставимости данных.

Отдельно следует отметить, что термодинамический подход не учитывает влияние скорости ветра в период отбора проб. В работе (Halsall et al., 1999) отмечается, что, изменчивые метеорологические условия во время длительного отбора проб маскируют зависящий от температуры воздухообмен с поверхностью. Имеющиеся на этот счет в литературе данные (Wania et al., 1998) показывают, что углы наклонов линейной зависимости $\ln P \sim 1/T$ для ПХБ максимальны ($m = -7236 \pm 1121$) и слабо зависят от скорости ветра при значениях < 3 м/с, в то время как при скорости ветра > 9 м/с температурная зависимость полностью теряется ($m = -1094 \pm 3318$).

В нашем случае в периоды отбора проб с 2022 по 2024 гг. на территории г. Байкальска средняя и медианная скорости ветра составляли 1.02 и 1.01 м/с соответственно, а максимальная – не превышала 1.96 м/с. Для исследуемого района характерно большое количества дней с низкими скоростями ветра (< 1 м/с). В холодный и теплый периоды доля низких скоростей ветра достигала 27.3% и 21.8% случаев соответственно. Преимущественные направления ветра в теплый и холодный периоды являются западными, т.е. перенос воз-

душных масс происходит из селитебной территории города (рис. 3). Анализ повторяемости направления ветра в периоды отбора пробы воздуха показал, что статистически значимых корреляций между уровнями концентрации ПХБ в воздухе и направлением ветра не выявлено. Это относится как к теплomu, так и холодному периоду.

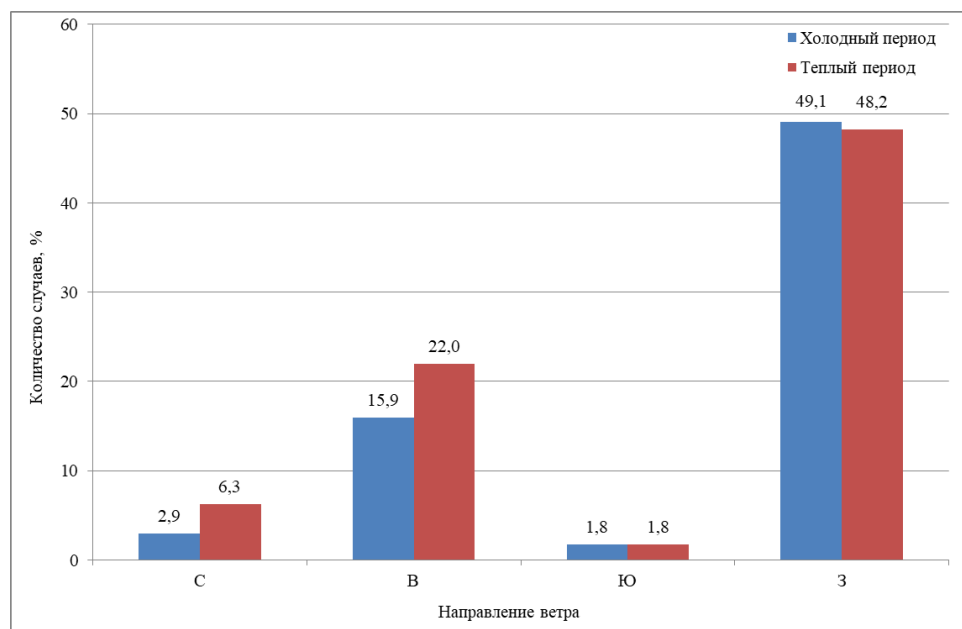


Рисунок 3. Частота направлений ветра в теплый и холодный периоды 2022-2024 гг.

Figure 3. Frequency of wind directions in the warm and cold periods of 2022-2024

Кроме того, углы наклонов зависимостей $\ln P$ от $1/T$, построенных по данным мониторинга, сопоставляли со значениями углов наклонов расчетных данных, полученных по литературным данным зависимостей парциального давления конгенов ПХБ от температуры, полученным в работе (Falconer and Bidleman, 1994) (табл. 3).

Результаты вычислений экспериментальных и расчетных углов наклонов, полученные в результате круглогодичных измерений 2022-2024 гг., представлены в табл. 3.

Как следует из табл. 3 зависимость парциального давления от температуры в *холодный период* была статистически незначима для всех конгенов ПХБ на уровне 95% ($p > 0.05$), а наклоны варьировались от -311 до -3755. Полученные данные свидетельствует о том, что зимой, когда почва покрывается снегом, процессы испарения существенно замедляются, а на формирование концентраций ПХБ в приземном слое атмосферы г. Байкальска оказывает влияние адвекции воздушных масс из других районов.

В *теплый период* наблюдается заметная и высокая корреляция $\ln P$ от $1/T$ для всех конгенов ПХБ (коэффициенты корреляции Пирсона находятся в диапазоне от 0.59 до 0.84 по модулю), кроме ПХБ-28 ($|r|=0.49$). Значения углов наклонов в теплый период находятся в пределах от -5078 до -8739. Получен-

ные абсолютные значения m сопоставимы со значениями, полученные другими авторами в промышленных городах Кардифф (от -2985 до -6222) и Манчестер (от -3100 до -8272) (Halsall et al., 1999).

Таблица 3. Температурная зависимость парциального давления ПХБ в 2022-2024 гг.

Table 3. Temperature dependence of the partial pressure of PCBs in 2022-2024

Конгенер ПХБ	Экспериментальные данные								Расчет- ные дан- ные*
	Холодный период 2022-2024				Теплый период 2022-2024				
	m	r	R ²	P-зна- чение	m	r	R ²	P-зна- чение	
ПХБ-28	-2871 (±5761)	-0.22	0.05	0.31	-5078 (±2901)	-0.49	0.24	<0.01	-9385
ПХБ-44	-1963 (±3979)	-0.21	0.05	0.32	-7882 (±1987)	-0.79	0.62	<0.01	-9739
ПХБ-52	-1304 (±3238)	-0.18	0.03	0.41	-8038 (±1814)	-0.82	0.67	<0.01	-9719
ПХБ-66	-311 (±4341)	-0.03	0.00	0.88	-7775 (±1830)	-0.81	0.65	<0.01	-10016
ПХБ-87	-1604 (±9273)	-0.08	0.01	0.72	-8739 (±2065)	-0.81	0.65	<0.01	-10506
ПХБ-101	-522 (±4784)	-0.05	0.00	0.82	-8727 (±1799)	-0.84	0.71	<0.01	-10396
ПХБ-105	-3755 (±10617)	-0.15	0.02	0.47	-5904 (±2640)	-0.59	0.34	<0.01	-10958
ПХБ-118	-1683 (±7918)	-0.09	0.01	0.66	-6350 (±2334)	-0.66	0.44	<0.01	-10741
ПХБ-138	-2676 (±7591)	-0.15	0.02	0.47	-6787 (±2338)	-0.69	0.47	<0.01	-11054
ПХБ-153	-1658 (±5835)	-0.12	0.02	0.56	-6603 (±2391)	-0.67	0.44	<0.01	-10997
ПХБ-180	-1961 (±10872)	-0.08	0.01	0.71	-6170 (±2749)	-0.59	0.35	<0.01	-11612
ПХБ-187	-2512 (±7920)	-0.14	0.02	0.52	-8284 (±2868)	-0.68	0.47	<0.01	-11462

Примечание: * – значения, приведенные в публикации (Falconer and Bidleman, 1994), были преобразованы в значения натуральных логарифмов ($\ln P = 2.303 \times \lg P$).

Численные значения параметра m (угла наклона линейной зависимости $\ln P$ от $1/T$) дают возможность идентификации источников поступления ПХБ в атмосферный воздух. В работе (Wania et al., 1998) была установлена зависимость угла наклона от предполагаемых источников ПХБ. Так для городских промышленных районов значения m варьируют от -6000 до -7000, диапазон от -4000 до -5000 характерен для сельской местности, а для фоновых арктических районов угол наклона составляет примерно -1400.

В нашем исследовании значения параметра m зависимостей $\ln P$ от $1/T$ для всех конгенов ПХБ в теплый период хотя и сопоставимы, однако ожидаемо ниже, чем значения, рассчитанные по литературным данным зависимостей парциального давления над насыщенным раствором (Falconer and Bidleman, 1994) (табл. 3). Причина такого отклонения – влияние многочисленных внешних факторов (в первую очередь метеорологических), которые не могут быть учтены при моделировании процесса простым уравнением Клапейрона–Клаузиуса.

Зависимость $\ln P$ от $1/T$ в интервале температур (от -21.4 до 23.8 °C) имеет сложный характер. В качестве примера на рис. 4 показаны графики

зависимости $\ln P$ от $1/T$ для конгенера ПХБ-52 построенные по данным мониторинга 2022-2024 гг. Он наглядно иллюстрирует два прямолинейных участка и излом на прямой. В тёплый период (красные точки) наблюдается характерная линейная зависимость $\ln P$ от $1/T$. При отрицательных температурах в холодный период (синие точки) статистически значимая зависимость давления пара конгенов ПХБ от температуры отсутствует. Подобный излом в точке с температурой около 0°C наблюдали и другие авторы, например, (Hoff et al., 1998 и др.). Зеленая линия на рис. 4 демонстрирует зависимость $\ln P \sim 1/T$ для конгенера ПХБ-52, построенная по литературным данным, полученным в лабораторных условиях, и ее угол наклона выше, чем наклон экспериментальных данных (красные точки) в реальных условиях. Аналогичную картину можно увидеть и для остальных конгенов ПХБ (табл. 3).

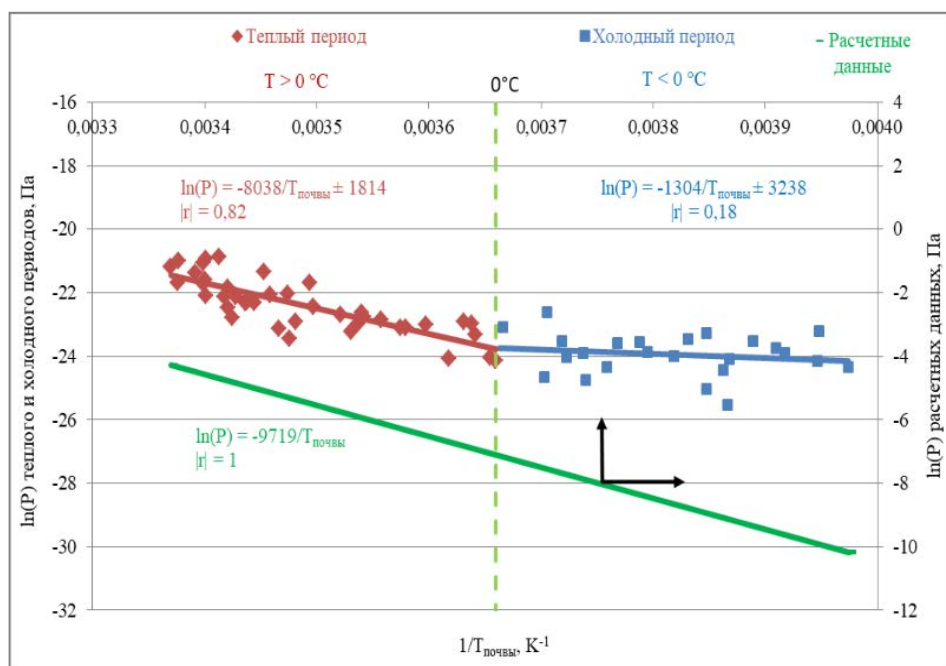


Рисунок 4. Температурная зависимость концентраций ПХБ-52 в теплый и холодный периоды 2022-2024 гг.

Figure 4. Temperature dependence of PCB-52 concentrations in the warm and cold periods of 2022-2024

Для более тяжелых конгенов ПХБ (начиная с ПХБ-105) наблюдается смещение точки излома зависимости $\ln P$ от $1/T$ в область положительных температур. В статье (Hoff et al., 1992) было показано, что для каждого химического вещества фиксируется, так называемая, «температура замерзания», ниже которой линейная зависимость парциального давления от температуры меняет свой наклон, становясь горизонтальной. Так, например, концентрация ПХБ-52 в газовой фазе перестает линейно зависеть от температуры ниже приблизительно $+5^\circ\text{C}$, а для концентраций γ -ГХЦГ соответствующая температура составляла около -5°C (Hoff et al., 1992).

Обработка данных мониторинга показала, что «температура замерзания» для «тяжелых» ПХБ-105, 118, 138, 153 и 180 составила 1.9-3.4°C (табл. 4). Изменение не слишком большое по сравнению с данными, приведенными в табл. 3, однако приближает экспериментально найденные значения к расчетным данным авторов (Falconer and Bidleman, 1994).

Таблица 4. Температурная зависимость парциального давления ПХБ в 2022-2024 гг.

Table 4. Temperature dependence of the partial pressure of PCBs in 2022-2024

Конгенер	«Температура замерзания», °C	Параметры линейной регрессии с учетом «температуры замерзания»				Расчетные данные (Falconer and Bidleman, 1994)
		m	r	R ²	P-значение	m
ПХБ-105	2.4	-8362 (±3178)	-0.67	0.45	<0.01	-10958
ПХБ-118	1.9	-8435 (±2550)	-0.75	0.56	<0.01	-10741
ПХБ-138	2.4	-8633 (±2727)	-0.74	0.54	<0.01	-11054
ПХБ-153	3.4	-8336 (±3222)	-0.67	0.45	<0.01	-10997
ПХБ-180	3.4	-8415 (±3726)	-0.62	0.38	<0.01	-11612

Дополнительное подтверждение применимости термодинамической модели для описания переноса ПХБ в системе почва-атмосфера может быть получено путем расчета энтальпий их испарения $\Delta H_{\text{э исп}}$ (уравнение (4) по данным мониторинга и сравнение с литературными данными. В качестве литературных данных использовали значения энтальпий, полученные на основании лабораторных исследований зависимостей от температуры константы Генри (ΔH_{KH}) (Bamford et al., 2002) и давления пара ($\Delta H_{\text{ГАЗ}}$) (Falconer, Bidleman, 1994) конгенов ПХБ.

Из данных табл. 5 можно сказать, что даже литературные данные сильно различаются между собой (до 3 раз), что, по-видимому, является следствием оценки различных процессов (испарения чистых веществ) и испарения из растворов, а также различных методов исследования. Тем не менее, полученные на основании данных мониторинга расчетные значения энтальпий достаточно неплохо совпадают с литературными данными. Если говорить о причинах расхождения, то они приблизительно те же самые, что и при сравнении наклонов зависимостей $\ln P$ от $1/T$.

Оценка вклада глобального и регионального переноса ПХБ

Из-за особенностей глобальной циркуляции атмосферы ПХБ обнаруживаются в самых отдаленных районах земного шара, незатронутых человеческой деятельностью. Среднегодовые концентрации ПХБ, обнаруженные в районах Арктики и Антарктики, изменяются от нескольких единиц до нескольких десятков нг/м^3 (табл. 6). Уровни концентраций ПХБ в точке наблюдений будут складываться из глобальных фоновых концентраций, а также поступлений из региональных и локальных источников.

Таблица 5. Сравнение энтальпий испарения конгенов ПХБ (ΔH) (кДж/моль)

Table 5. Comparison of the enthalpies of evaporation of PCB congeners (ΔH) (kJ/mol)

Конгенер ПХБ	$\Delta H_{\text{Эксп.}}$	$\Delta H_{\text{КН}}$ (Bamford et al., 2002)	$\Delta H_{\text{ГАЗ}}$ (Falconer and Bidleman, 1994)
ПХБ-28	42.2±24.1	33±2	78.02
ПХБ-44	65.5±16.5	26±2	80.97
ПХБ-52	66.8±15.1	31±3	80.80
ПХБ-66	64.6±15.2	29±3	83.27
ПХБ-87	72.7±17.2	33±4	87.35
ПХБ-101	72.6±15.0	30±3	86.43
ПХБ-105	49.1±22.0	76±8	91.10
ПХБ-118	52.8±19.4	50±6	89.30
ПХБ-138	56.4±19.4	87±7	91.91
ПХБ-153	54.9±19.9	66±5	91.43
ПХБ-180	51.3±22.9	144±7	96.54
ПХБ-187	68.9±23.8	96±7	95.30

Таблица 6. Концентрации ПХБ в арктических и антарктических районах

Table 6. Concentrations of PCBs in Arctic and Antarctic regions

Место отбора проб	Концентрация, пг/м ³			Ссылка
	$\Sigma \text{ПХБ}_7$	$\Sigma \text{ПХБ}_{10}$	$\Sigma \text{ПХБ}$	
Алерт (Канада)	–	4.0	–	(Hung et al., 2010)
Паллас (Финляндия)	6.3	–	–	
Сторхофди (Исландия)	–	10.2	–	
Цеппелин (Норвегия)	–	13.0	–	
Антарктида (среднее из 4-х мест отбора проб)	1.14	1.16	36.8	(Li et al., 2012)
Тикси (Россия), холодный период	6.4	7.0	12.9	(Запевалов и др., 2020)
Тикси (Россия), теплый период	13.1	14.9	27.1	

Для установления доли глобальных фоновых концентраций в Байкальске целесообразно использовать данные по Тикси, расположенном приблизительно на той же долготе на севере региона Восточной Сибири. Они полностью сопоставимы с данными Байкальска, поскольку количественные химические анализы проб воздуха проведены в одной и той же лаборатории с применением одинаковой методики анализа и оборудования.

Сопоставляя значения концентраций ПХБ в этих населенных пунктах, приведенные в табл. 6 и на рис. 1, можно заключить, что доля глобальных фоновых концентраций в Байкальске не превышает 10%.

Заключение

За период наблюдений 2022-2024 годов среднегодовые концентрации суммы ПХБ в атмосфере Байкальска составляли величину около 3×10^2 пг/м³, являлись типичными для территорий с незначительным антропогенным влиянием. Эти уровни примерно на порядок выше глобальных фоновых значений концентраций ПХБ для арктического региона Восточной Сибири (12-27 пг/м³) и обусловлены влиянием локальных источников выбросов и воздушным переносом от региональных источников.

Годовой ход концентраций ПХБ в г. Байкальске имеет отчетливую сезонную изменчивость концентраций, формирующуюся под влиянием различных антропогенных и природных факторов окружающей среды. Среди природных факторов наибольшее влияние оказывает температура.

В холодный период концентрации ПХБ в атмосфере приблизительно в 3-4 раза ниже, чем в теплый, практически не зависят от температуры и формируются главным образом за счет регионального, глобального и, возможно, трансграничного переноса ПХБ с воздушными массами.

В теплый период испарение ПХБ с поверхности почвы становится доминирующим процессом загрязнения воздуха. Это подтверждается статистически значимой функциональной связью уровней концентраций конгенов ПХБ в атмосфере и температуры почвы, которая удовлетворительно описывается уравнением Клапейрона-Клаузиуса.

Рассчитанные по экспериментальным данным углы наклона линейных зависимостей $\ln P$ от $1/T$ в теплый период ниже значений аналогичных зависимостей для равновесного парциального давления для всех конгенов ПХБ. Это свидетельствует о наличии и значительном вкладе неучтенных факторов при использовании термодинамического подхода. Полученные результаты показывают необходимость дальнейшего изучения механизмов формирования загрязнения приземного воздуха ПХБ поступающими из почвы, как экспериментальными методами, так и с помощью моделирования, уточняя описание процессов определяющих массообмен между почвой и атмосферой.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам Федерального государственного бюджетного учреждения «Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» Росгидромета за отбор проб атмосферного воздуха и предоставление метеорологических данных, а также сотрудникам аккредитованной аналитической лаборатории ИПМ ФГБУ «НПО «Тайфун» за выполнение хромато-масс-спектрометрических анализов проб (руководитель канд. хим. наук. Д.П. Самсонов).

Список литературы

Герасимов, Я.И., Древинг, В.П., Еремин, Е.Н., Киселев, А.В., Лебедев, В.П., Панченков, Г.М., Шлыгин, А.И. (1964) *Курс физической химии*, том 1, под общей ред. чл.-корр. АН СССР проф. Я.И. Герасимова, М., Химия, 624 с.

ГОСТ Р ИСО 16000-14-2013 *Определение общего содержания полихлорированных диоксиноподобных бифенилов (ПХБ) и полихлорированных дибензо-пара-диоксинов/дибензо-фуранов (ПХДД/ПХДФ) (в газообразном состоянии и в виде твердых взвешенных частиц). Экстракция, очистка и анализ методами газовой хроматографии и масс-спектрометрии высокого разрешения* (2016) URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200107550> (дата обращения: 26.02.2026).

Запевалов, М.А., Самсонов, Д.П., Кочетков, А.И., Пасынкова, Е.М., Богачева, Е.Г. (2020) Глобальный атмосферный перенос стойких органических загрязнителей в Арктическую зону Российской Федерации, *Метеорология и гидрология*, № 9, с. 90-103.

Кузьмин, М.И., Тарасова, Е.Н., Мамонтова, Е.А., Мамонтов, А.А., Хомутова, М.Ю. (2013) Воздействие сточных вод и атмосферных выбросов байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) на озеро Байкал, *Ученые записки российского государственного гидрометеорологического университета*, № 28, с. 51-57.

Левшин, Д.Г., Запевалов, М.А., Бурков, А.И. (2024) Распределение полихлорированных бифенилов в системе почва–атмосфера на южном побережье озера Байкал, *Гидрометеорология и экология*, вып. 77, с. 716-738, doi:10.33933/2713-3001-2024-77-716-738.

Липка, О.Н., Богданович, А.Ю., Андреева, А.П., Караваева, А.С., Крыленко, С.В., Стерин, А.М., Коршунова, Н.Н. (2024) Наблюдаемые изменения климата в бассейнах Байкала и Ангары, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 2, с. 244-271.

Морозова, Е.А., Алейникова, А.М., Алейников, А.А. (2025) Потепление в Прибайкалье в XXI веке на основе анализа космических снимков, Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды, адаптация к изменениям климата. *Материалы IV всероссийской научной конференции с международным участием*, Москва, 24-28 ноября 2025 г., М., ФГБУ «ИГКЭ», с. 171-174.

Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 25.01.2021 № 37 «Об утверждении гигиенических нормативов» (2021) URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100037> (дата обращения: 27.04.2026).

Приказ Госкомэкологии России от 13.04.1999 № 165 «О рекомендациях для целей инвентаризации на территории Российской Федерации производств, оборудования, материалов, использующих или содержащих ПХБ, а также ПХБ-содержащих отходов» (1999) URL: <https://docs.cntd.ru/document/901733732> (дата обращения: 26.02.2026).

ТКП 17.08-13-2021 *Правила расчета выбросов стойких органических загрязнителей и полициклических ароматических углеводородов* (2021) URL: <https://normy.by/tnpa/1/7889.pdf> (дата обращения: 26.02.2026).

Ashworth, D.J., Luo, L., Yates, S.R. (2013) Pesticide emissions from soil, fate and predictability, *Outlooks on Pest Management*, doi:10.1564/v24_feb_02.

Bamford, H.A., Poster, D.L., Baker, J.E. (2000) Henry's law constants of polychlorinated biphenyl congeners and their variation with temperature, *Journal of Chemical and Engineering Data*, vol. 45, iss. 6, pp. 1069-1074, doi.org/10.1021/je0000266.

Bamford, H.A., Poster, D.L., Huie, R.E., Baker, J.E. (2002) Using Extrathermodynamic Relationships To Model the Temperature Dependence of Henry's Law Constants of 209 PCB Congeners, *Environmental Science and Technology*, vol. 36, iss. 20, pp. 4395-4402, doi.org/10.1021/es020599y.

Basra, K., Scammell, M.K., Benson, E.B., Heiger-Bernays, W. (2018) Ambient Air Exposure to PCBs. Regulation and Monitoring at Five Contaminated Sites in EPA Regions 1, 2, 4, 5, *New Solut.*, vol. 28, iss. 2, pp. 262-282, doi: 10.1177/1048291118763620.

Burgoyne, T.W., Hites, R.A. (1993) Effects of temperature and wind direction on the atmospheric concentrations of α -Endosulfan, *Environmental Science and Technology*, vol. 27, iss. 5, pp. 910-914, doi.org/10.1021/es00042a013.

DIN EN 1948-4:2014 (2014) *Stationary Source Emissions. Determination of the Mass Concentration of PCDDs/PCDFs and Dioxin-like PCBs, Part 4 Sampling and Analysis of Dioxin-like PCBs*.

Environmental Protection Agency (US). IRIS file for polychlorinated biphenyls (PCBs) CASRN 1336-36-3, https://cfpub.epa.gov/ncea/iris2/chemicalLanding.cfm?substance_nmbr=294 (дата обращения: 27.04.2026).

Falconer, R.L., Bidleman, T.F. (1994) Vapor pressures and predicted particle/gas distributions of polychlorinated biphenyl congeners as functions of temperature and ortho-chlorine substitution, *Atmospheric Environment*, vol. 28, iss. 3, pp. 547-554, doi.org/10.1016/1352-2310(94)90130-9.

Halsall, C.J., Gevao, B., Howsam, M., Lee, R.G.M., Ockenden, W.A., Jones, K.C. (1999) Temperature dependence of PCBs in the UK atmosphere, *Atmospheric Environment*, vol. 33, pp. 541-552, doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00288-X.

Hoff, R.M., Brice, K.A., Halsall, C.J. (1998) Nonlinearity in the Slopes of Clausius-Clapeyron Plots for SVOCs, *Environmental Science and Technology*, vol. 32, iss. 12, pp. 1793-1798, doi.org/10.1021/es9709740.

Hoff, R.M., Muir, D.C.G., Grift, N.P. (1992) Annual cycle of polychlorinated biphenyls and organohalogen pesticides in air in southern Ontario. 2. Atmospheric transport and sources, *Environmental Science and Technology*, vol. 26, iss. 2, pp. 276-283, doi.org/10.1021/es00026a006.

Hornbuckle, K.C., Eisenreich, S.J. (1996) Dynamics of gaseous semivolatile organic compounds in a terrestrial ecosystem—effects of diurnal and seasonal climate variations, *Atmospheric Environment*, vol. 30, iss. 23, pp. 3935-3945, doi.org/10.1016/1352-2310(96)00135-5.

Hung, H., Kallenborn, R., Breivik, K., Su Y., Brorström-Lundén, E., Olafsdottir, K., Thorlacius, J.M., Leppänen, S., Bossi, R., Skov, H., Manø, S., Patton, G.W., Stern, G., Sverko, E., Fellin, P. (2010) Atmospheric monitoring of organic pollutants in the Arctic under the Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 1993-2006, *Science of the Total Environment*, vol. 408, iss. 15, pp. 2854-2873, doi:10.1016/j.scitotenv.2009.10.044.

Li, Y.-F., Harner, T., Liu, L., Zhang, Z., Ren, N.-Q., Jia, H., Ma, J., Sverko, E. (2010) Polychlorinated Biphenyls in Global Air and Surface Soil. Distributions, Air–Soil Exchange, and Fractionation Effect, *Environmental Science and Technology*, vol. 44, iss. 8, pp. 2784-2790, doi.org/10.1021/es901871e.

Li, Y M., Geng, D W., Hu, Y B., Wang, P., Zhang, Q H., Jiang, G B. (2012) Levels and distribution of polychlorinated biphenyls in the atmosphere close to Chinese Great Wall Station, Antarctica. Results from XAD-resin passive air sampling, *Chinese Science Bulletin*, vol. 57, no 13, pp. 1499-1503, doi: 10.1007/s11434-012-5048-8.

Mackay, D, Shiu, W.Y., Ma, K.-C., Lee, S.C. (2006) *Handbook of physical–chemical properties and environmental fate for organic chemicals*. 2-nd edition, 1343 p., doi:10.1201/9781420044393.

Megson, D., Benoit, N.B., Sandau, C.D., Chaudhuri, S.R., Long, T., Coulthard, E., Johnson, G.W. (2019) Evaluation of the effectiveness of different indicator PCBs to estimating total PCB concentrations in environmental investigations, *Chemosphere*, vol. 237, 124429, doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124429.

Mohankumar, T., Venugopal, D., Beerappa, R., Palaniyappan, J., Lingayya, R., Salavath, J., Ambikapathy, M., Karunamoorthy, P. (2025) Assessment of polychlorinated biphenyls (PCBs) in ambient air and its health risk evaluation in an urban city, Bangalore, India, *Atmospheric Environment*, X, vol. 28, 100371, doi.org/10.1016/j.aeaoa.2025.100371.

Tasdemir, Y., Salihoglu, G., Salihoglu, N. K., Birgül, A. (2012) Air–soil exchange of PCBs. Seasonal variations in levels and fluxes with influence of equilibrium conditions, *Environmental Pollution*, vol. 169, pp. 90-97, doi.org/10.1016/j.envpol.2012.05.022.

UNEP/POPS/COP.12/INF/11 (2025) *Revised strategy for Parties to meet the 2025 and 2028 goals on polychlorinated biphenyls of the Stockholm Convention*. URL: <https://www.pops.int/TheConvention/ConferenceoftheParties/Meetings/COP12/tabid/9744/Default.aspx> (дата обращения: 26.02.2026).

Wania, F., Haugen, J-E., Lei, Y. D., Mackay, D. (1998) Temperature dependence of atmospheric concentrations of semivolatile organic compounds, *Environmental Science and Technology*, vol. 32, no 8, pp. 1013-1021, doi.org/10.1021/es970856c.

Zhu, M., Yuan, Y., Yin, H., Guo, Z., Wei, X., Qi, X., Liu, H., Dang, Z. (2022) Environmental contamination and human exposure of polychlorinated biphenyls (PCBs) in China. A review, *Science of The Total Environment*, vol. 805, 150270, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150270.

References

Gerasimov, Ya.I., Dreving, V.P., Eremin, E.N., Kiselev, A.V., Lebedev, V.P., Panchenkov, G.M., Shlygin, A.I. (1964) *Kurs fizicheskoy khimii, tom 1, pod obshchey red. chl.-korr. AN SSSR prof. YA.I. Gerasimova* [Course of Physical Chemistry, volume 1, under the general editorship of corresponding member Ya.I. Gerasimova USSR Academy of Sciences], Khimiya, Moscow, Russia, 624 p.

GOST R ISO 16000-14-2013 *Opredeleniye obshchego sodержaniya polikhlorirovannykh dioksinopodobnykh bifenilov (PKHB) i polikhlorirovannykh dibenzo-para-dioksinov/dibenzo-furanov (PKHDD/PKHDF) (v gazoobraznom sostoyanii i vide tverdykh vzveshennykh chastits). Ekstraktsiya, ochistka i analiz metodami gazovoy khromatografii i mass-spektrometrii vysokogo razresheniya* (2016) [Determination of the total content of polychlorinated dioxin-like biphenyls (PCBs) and polychlorinated dibenzo-para-dioxins/dibenzo-furans (PCDD/PCDF) (in a gaseous state and as suspended solids). Extraction, purification and analysis by high-resolution gas chromatography and mass spectrometry] URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200107550> (accessed: 26.02.2026).

Zapevalov, M.A., Samsonov, D.P., Kochetkov, A.I., Pasynkova, E.M., Bogacheva, E.G. (2020) Global'nyy atmosferynyy perenos stoykikh organicheskikh zagryazniteley v Arkticheskuyu zonu Rossiyskoy Federatsii [Global atmospheric transport of persistent organic pollutants to the Arctic zone of the Russian Federation], *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], no. 9, pp. 90-103.

Kuzmin, M.I., Tarasova, E.N., Mamontova, E.A., Mamontov, A.A., Khomutova, M.Yu. (2013) *Vozdeystviye stochnykh vod i atmosferynykh vybrosov baykal'skogo tsellyulozno-bumazhnogo kombinata (BTSBK) na ozero Baykal* [Impact of wastewater and atmospheric emissions from the Baikal pulp and paper mill (BPPM) on Lake Baikal], *Uchenyye zapiski rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* [Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University], no. 28, pp. 51-57.

Levshin, D.G., Zapevalov, M.A., Burkov, A.I. (2024) *Raspredeleniye polikhlorirovannykh bifenilov v sisteme pochva-atmosfera na yuzhnom poberezh'ye ozera Baykal* [Distribution of polychlorinated biphenyls in the soil-atmosphere system on the southern coast of Lake Baikal], *Gidrometeorologiya i*

ekologiya [Hydrometeorology and Ecology], iss. 77. pp. 716-738, doi:10.33933/2713-3001-2024-77-716-738.

Lipka, O.N., Bogdanovich, A.Yu., Andreeva, A.P., Karavaeva, A.S., Krylenko, S.V., Sterin, A.M., Korshunova, N.N. (2024) Nablyudayemye izmeneniya klimata v basseynakh Baykala i Angary [Observed climate changes in the Baikal and Angara basins], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya* [Fundamental and Applied Climatology], vol. 10, no. 2, p. 244-271.

Morozova, E.A., Aleinikova, A.M., Aleinikov, A.A. (2025) *Potepleniye v Pribaykal'ye v XXI veke na osnove analiza kosmicheskikh snimkov* [Warming in the Baikal region in the 21st century based on the analysis of space images], *Monitoring sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy, adaptatsiya k izmeneniyam klimata. Materialy IV vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Moskva, 24-28 noyabrya 2025 g* [Monitoring the state and pollution of the environment: adaptation to climate change. Proceedings of the IV All-Russian scientific conference with international participation. Moscow, November 24-28, 2025], FGBU "IGKE", Moscow, Russia, pp. 171-174.

Postanovleniye Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 25.01.2021 № 37 «Ob utverzhdenii gigiyenicheskikh normativov» [Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated 25.01.2021 No. 37 "On approval of hygienic standards"] (2021) URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100037> (accessed: 27.04.2026).

Prikaz Goskomekologii Rossii ot 13.04.1999 № 165 «O rekomendatsiyakh dlya tseley inventarizatsii na territorii Rossiyskoy Federatsii proizvodstv, oborudovaniya, materialov, ispol'zuyushchikh ili sodержashchikh PKHB, a takzhe PKHB-soderzhashchikh otkhodov» [Order of the State Committee on Ecology of Russia dated 13.04.1999 No. 165 "On recommendations for the purposes of inventory on the territory of the Russian Federation of production facilities, equipment, materials using or containing PCBs, as well as PCB-containing waste"] (1999) URL: <https://docs.cntd.ru/document/901733732> (accessed: 26.02.2026).

TKP 17.08-13-2021 *Pravila rascheta mezhdunarodnykh standartov zagryazniteley i politsiklicheskikh aromaticeskikh uglevodorodov* (2021) [Rules for calculating international standards for pollutants and polycyclic aromatic hydrocarbons] URL: <https://normy.by/tnpa/1/7889.pdf> (accessed: 26.02.2026).

Ashworth, D.J., Luo, L., Yates, S.R. (2013) Pesticide emissions from soil, fate and predictability, *Outlooks on Pest Management*, doi:10.1564/v24_feb_02.

Bamford, H.A., Poster, D.L., Baker, J.E. (2000) Henry's law constants of polychlorinated biphenyl congeners and their variation with temperature, *Journal of Chemical and Engineering Data*, vol. 45, iss. 6, pp. 1069-1074, doi.org/10.1021/je0000266.

Bamford, H.A., Poster, D.L., Huie, R.E., Baker, J.E. (2002) Using Extrathermodynamic Relationships To Model the Temperature Dependence of

Henry's Law Constants of 209 PCB Congeners, *Environmental Science and Technology*, vol. 36, iss. 20, pp. 4395-4402, doi.org/10.1021/es020599y.

Basra, K., Scammell, M.K., Benson, E.B., Heiger-Bernays, W. (2018) Ambient Air Exposure to PCBs. Regulation and Monitoring at Five Contaminated Sites in EPA Regions 1, 2, 4, and 5, *New Solut.*, vol. 28, iss. 2, pp. 262–282, doi: 10.1177/1048291118763620.

Burgoyne, T.W., Hites, R.A. (1993) Effects of temperature and wind direction on the atmospheric concentrations of α -Endosulfan, *Environmental Science and Technology*, vol. 27, iss. 5, pp. 910-914, doi.org/10.1021/es00042a013.

DIN EN 1948-4:2014 (2014) *Stationary Source Emissions. Determination of the Mass Concentration of PCDDs/PCDFs and Dioxin-like PCBs, Part 4. Sampling and Analysis of Dioxin-like PCBs.*

Environmental Protection Agency (US). IRIS file for polychlorinated biphenyls (PCBs) CASRN 1336-36-3, https://cfpub.epa.gov/ncea/iris2/chemicalLanding.cfm?substance_nmbr=294 (accessed: 27.04.2026).

Falconer, R.L., Bidleman, T.F. (1994) Vapor pressures and predicted particle/gas distributions of polychlorinated biphenyl congeners as functions of temperature and ortho-chlorine substitution, *Atmospheric Environment*, vol. 28, iss. 3, pp. 547-554, doi.org/10.1016/1352-2310(94)90130-9.

Halsall, C.J., Gevao, B., Howsam, M., Lee, R.G.M., Ockenden, W.A., Jones, K.C. (1999) Temperature dependence of PCBs in the UK atmosphere, *Atmospheric Environment*, vol. 33, pp. 541-552, doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00288-X.

Hoff, R.M., Brice, K.A., Halsall, C.J. (1998) Nonlinearity in the Slopes of Clausius-Clapeyron Plots for SVOCs, *Environmental Science and Technology*, vol. 32, iss. 12, pp. 1793-1798, doi.org/10.1021/es9709740.

Hoff, R.M., Muir, D.C.G., Grift, N.P. (1992) Annual cycle of polychlorinated biphenyls and organohalogen pesticides in air in southern Ontario. 2. Atmospheric transport and sources, *Environmental Science and Technology*, vol. 26, iss. 2, pp. 276-283, doi.org/10.1021/es00026a006.

Hornbuckle, K.C., Eisenreich, S.J. (1996) Dynamics of gaseous semivolatile organic compounds in a terrestrial ecosystem—effects of diurnal and seasonal climate variations, *Atmospheric Environment*, vol. 30, iss. 23, pp. 3935-3945, doi.org/10.1016/1352-2310(96)00135-5.

Hung, H., Kallenborn, R., Breivik, K., Su, Y., Brorström-Lundén, E., Olafsdottir, K., Thorlacius, J.M., Leppänen, S., Bossi, R., Skov, H., Manø, S., Patton, G.W., Stern, G., Sverko, E., Fellin, P. (2010) Atmospheric monitoring of organic pollutants in the Arctic under the Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) 1993-2006, *Science of the Total Environment*, vol. 408, iss. 15, pp. 2854-2873, doi:10.1016/j.scitotenv.2009.10.044.

Li, Y.-F., Harner, T., Liu, L., Zhang, Z., Ren, N.-Q., Jia, H., Ma, J., Sverko, E. (2010) Polychlorinated Biphenyls in Global Air and Surface Soil: Distributions,

Air–Soil Exchange, and Fractionation Effect, *Environmental Science and Technology*, vol. 44, iss. 8, pp. 2784-2790, doi.org/10.1021/es901871e.

Li, Y M., Geng, D W., Hu, Y B., Wang, P., Zhang, Q H., Jiang, G B. (2012) Levels and distribution of polychlorinated biphenyls in the atmosphere close to Chinese Great Wall Station, Antarctica: Results from XAD-resin passive air sampling, *Chinese Science Bulletin*, vol. 57, no 13, pp. 1499-1503, doi: 10.1007/s11434-012-5048-8.

Mackay, D, Shiu, W.Y., Ma, K.-C., Lee, S.C. (2006) Handbook of physical–chemical properties and environmental fate for organic chemicals. 2-nd edition, 1343 p., doi:10.1201/9781420044393.

Megson, D., Benoit, N.B., Sandau, C.D., Chaudhuri, S.R., Long, T., Coulthard, E., Johnson, G.W. (2019) Evaluation of the effectiveness of different indicator PCBs to estimating total PCB concentrations in environmental investigations, *Chemosphere*, vol. 237, 124429, doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124429.

Mohankumar, T., Venugopal, D., Beerappa, R., Palaniyappan, J., Lingayya, R., Salavath, J., Ambikapathy, M., Karunamoorthy, P. (2025) Assessment of polychlorinated biphenyls (PCBs) in ambient air and its health risk evaluation in an urban city, Bangalore, India, *Atmospheric Environment*, X, vol. 28, 100371, doi.org/10.1016/j.aecoa.2025.100371.

Tasdemir, Y., Salihoglu, G., Salihoglu, N. K., Birgül, A. (2012) Air–soil exchange of PCBs. Seasonal variations in levels and fluxes with influence of equilibrium conditions, *Environmental Pollution*, vol. 169, pp. 90-97, doi.org/10.1016/j.envpol.2012.05.022.

UNEP/POPS/COP.12/INF/11 (2025) Revised strategy for Parties to meet the 2025 and 2028 goals on polychlorinated biphenyls of the Stockholm Convention. URL: <https://www.pops.int/TheConvention/ConferenceoftheParties/Meetings/COP12/tabid/9744/Default.aspx> (accessed: 26.02.2026).

Wania, F., Haugen, J-E., Lei, Y. D., Mackay, D. (1998) Temperature dependence of atmospheric concentrations of semivolatile organic compounds, *Environmental Science and Technology*, vol. 32, no 8, pp. 1013-1021, doi.org/10.1021/es970856c.

Zhu, M., Yuan, Y., Yin, H., Guo, Z., Wei, X., Qi, X., Liu, H., Dang, Z. (2022) Environmental contamination and human exposure of polychlorinated biphenyls (PCBs) in China: A review. *Science of The Total Environment*, vol. 805, 150270, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150270.

Статья поступила в редакцию (Received): 17.03.2026.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 29.04.2026.

Для цитирования / For citation:

Левшин, Д.Г., Запевалов, М.А., Бурков, А.И. (2026) Полихлорированные бифенилы в атмосферном воздухе города Байкальска: возможные источ-

ники поступления и влияющие факторы, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVII, № 3-4, с. 44-68, doi: 10.24412/2782-3237-2026-3-4-44-68.

Levshin, D.G., Zapevalov, M.A., Burkov, A.I. (2026) Polychlorinated biphenyls in ambient air of Baikalsk town: possible sources and controlling factors, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXVII, no. 3-4, pp. 44-68, doi: 10.24412/2782-3237-2026-3-4-44-68.