
ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 550.47+550.43

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ ЗОН ЛОКАЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ

© 2017 г. А. А. Мамонтов*, Е. Н. Тарасова*, Е. В. Безрукова*, А. А. Щетников**,
Е. В. Иванов*, Е. А. Мамонтова*, М. И. Кузьмин*

* Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения РАН,
ул. Фаворского, 1А, а/я 304, Иркутск, 664033 Россия. E-mail: mamontov@igc.irk.ru

** Институт земной коры Сибирского отделения РАН,
ул. Лермонтова, 128, Иркутск, 664033 Россия. E-mail: shchet@crust.irk.ru

Поступила в редакцию 14.11.2016 г.

В результате исследования 3-метрового керна торфяника Выдринский (Vydr-2011-1), расположенного у подножия хребта Хамар-Дабан и относящегося к удаленным от Иркутско-Черемховской промзоны фоновым районам, в нем выявлены максимально высокие концентрации полихлорированных бифенилов (ПХБ) (2.48 мкг/см²) среди всех исследованных проб Байкальского региона, в том числе и из промышленных зон. Высокое содержание органического углерода по всей глубине керна и особенности локальных природных хроматографических процессов юго-восточной части Байкальской природной территории (БПТ) стали главными причинами значительного накопления ПХБ в торфянике Выдринский и на расположенном в непосредственной близости от него ветроударном склоне хребта Хамар-Дабан.

Ключевые слова: озеро Байкал, полихлорированные бифенилы, почва, торф, воздушный перенос.

ВВЕДЕНИЕ

Полихлорированные бифенилы (ПХБ) почти 60 лет являлись продуктом деятельности человека и в настоящее время составляют значительную часть списка стойких органических загрязнителей (СОЗ), к которым во всем мире уже более 40 лет приковано внимание научного сообщества. Обладая не только уникальными для промышленности физико-химическими, но и гормоноподобными свойствами, ПХБ оказывают значительное вредоносное воздействие на животный мир не только в районе источников их поступления в окружающую среду, но и в местах, удаленных на десятки и сотни километров от промышленных зон, где они производятся, хранятся или используются человеком [7].

Климатические и морфологические особенности каждого участка нашей планеты формируют свои системы локальной хроматографии СОЗ [11]. В отдельных районах, благодаря особенностям местности, климата, составам живого и биокосного вещества, имеются участки, обладающие одновременно и барьерными, и концентрирующими свойствами, в пределах которых могут осажаться

воздушные потоки СОЗ и многократно увеличиваться их концентрация за счет наличия сред с высокой сорбционной емкостью к СОЗ. Наиболее резко барьерные свойства проявляются в горных районах, где на протяжении всего нескольких километров климатические условия могут кардинально меняться [8], а расположенные у подножия гор торфяники быть естественными аккумуляторами СОЗ.

Наземная часть экосистемы оз. Байкал и его водосборного бассейна представляет собой горную страну площадью 540034 км², а обрамляющие ее хребты имеют направленность, перпендикулярную преобладающему северо-западному переносу воздушных масс [2]. Действие господствующих ветров на такой территории, согласно теории хроматографического распределения СОЗ в биосфере, даже при условии существования только дальнего переноса приведет к неравномерности их накопления в почвах. Наличие же значительных по аэропромвыбросам предприятий в регионе — неизбежная причина возникновения отдельных зон высоких концентраций в природных средах, обладающих даже слабыми сорбционными свойствами.

В районе Южного Байкала соблюдены все условия для возникновения таких зон. Здесь имеются значительные местные источники воздушной эмиссии ПХБ с территории Иркутско-Черемховского (ангарского) промышленного узла. Известно, что за все время его существования в оз. Байкал поступило приблизительно 8 т ПХБ (только из расчета осаждения на поверхность водного зеркала озера [10]). В 150–200 км на пути движения воздушных масс преобладающего западного и северо-западного направлений, насыщенных ПХБ в районе ангарского промышленного узла, расположен хребет Хамар-Дабан с высотами ~ 2000 м. И, если до этой преграды осаждение СОЗ происходит постепенно, как и в других направлениях [3], то при встрече с горным хребтом воздушные массы, поднимаясь вверх, охлаждаются и теоретически должны провоцировать значительное выпадение взвешенных частиц и газовой составляющей СОЗ на 3–30 км участке ветроударных склонов хр. Хамар-Дабан. Ветроударные склоны СЗ-экспозиции обильно покрыты темнохвойными лесами и стлаником, имеют минимальное для района колебание суточных температур, являясь, таким образом, почти идеальным воздушным фильтром. При этом все выпадения на склонах обильно промываются осадками, среднегодовая сумма которых здесь превышает 1200 мм [1]. В подножии ветроударных склонов расположены значительные пространства, занятые торфяниками. Предполагалось, что, обладая высоким содержанием углерода, в частности, торф болотного массива Выдринский теоретически должен быть своеобразным сорбентом, образующим зоны повышенных концентраций СОЗ и замедляющим дальнейшее движение ПХБ в оз. Байкал с дождевым стоком.

Цель настоящего исследования – обосновать возможность накопления повышенных концентраций ПХБ не только на склонах, но и в низинных средах, через которые происходит сток дождевых вод, промывающих ветроударные склоны.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб почв склона и торфяника произведен в 2011 г. на правом борту распадка р. Аносовка (от подножия хр. Хамар-Дабан, где расположен Выдринский торфяник, и до верхнего цирка). Проба из района источника ПХБ отобрана в зеленой зоне управления “Усольехимпрома” г. Усолье-Сибирское. Отбор проб почв склона производился трубочатым металлическим пробоотборником методом конверта на глубину до 15–20 см.

Пробы торфа по 1 см³ отбирались с каждого сантиметра 3.17-метрового керна (Vydr-2011) и объединены в горизонты 0–20, 20–40, 40–80, 80–120, 120–160, 160–200, 200–240, 240–280, 280–320 см для дальнейшей обработки и анализа. Горизонт 20–40 см был утерян в процессе очистки экстракта. Возраст торфа (самого нижнего слоя керна), согласно [6], соответствует возрасту ~ 9800 лет.

Количество растительных остатков максимально в верхнем слое керна. С глубины 1.6 м пробы визуальнo представляют собой однородную черную массу, и отдельных частиц растительных остатков с этого горизонта и глубже не наблюдалось.

Сушка проб проводилась при комнатной температуре до постоянного веса. В исходных пробах торфа приблизительно 85–90% массы составляла вода. В пробах склона и источника потеря веса при сушке составила 25–30% от исходного веса.

Все пробы просеивались сквозь металлические сита. Фракции < 2 мм в количестве от 12 до 150 г использовали для дальнейшего анализа.

Очистка и анализ проб на определение ПХБ. Экстракция проб производилась гексано-ацетоновой смесью в аппаратах Сокслетта в течение 8 час. ПХБ 65 и 14 были добавлены к анализируемым пробам в качестве внутреннего и суррогатного стандартов. Дальнейшая очистка включала гель-проникающую хроматографию и использование активированных окиси алюминия и силикагеля. Определение ПХБ выполнено на газовом хроматографе HP5890 с ДЭЗ. Процедура подготовки и хроматографического анализа описана в [4].

В экстрактах определялось 28 пиков индивидуальных соединений ПХБ и их групп (4/10, 7/9, 6, 5/8, 31, 28, 52, 49, 44, 74, 70/76, 95/66, 101/90, 99, 97, 87/115, 85, 110, 118, 153, 105, 138, 158, 187, 183, 128/167, 180, 190/170).

Определение органического углерода выполнено по стандартной методике [5]. Математическая обработка проводилась в программе “STATISTICA 6.0”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Концентрации органического углерода в торфе из керна Vydr-2011 в среднем незначительно увеличивались с глубиной (таблица). Положительная корреляция между содержанием органического углерода и ПХБ составила $r = 0.77$ при $p < 0.05$ и свидетельствует, что на период исследования торфяник не испытывал повышенное

Содержание органического углерода в керне торфяника Выдринский

Горизонт (см)	0–20	40–80	80–120	120–160	160–200	200–240	240–280	280–317
Содержание C _{орг} (%)	10.2	9.11	8.86	9.68	10.59	10.49	10.91	11.59

сверх своей емкости поступление ПХБ. В пробах почв склона № 290 и 294 концентрации органического углерода составили 4.85 и 2.51%, а содержание ПХБ 18 и 14 нг/г соответственно.

Концентрации ПХБ торфяника Выдринский в расчете на площадь земной поверхности, оказались более чем в 2 раза выше максимальных значений в пробах почв в зоне “источника” – г. Усолье Сибирское.

В районе торфяника нет никаких промышленных, жилых объектов, свалок промышленных или бытовых отходов. В то же время составы ПХБ торфяника и склоновых проб почти идентичны (рис. 1), что говорит об исключительно воздушном источнике их поступления. Влияние расположенного в 50 км западнее Байкальского целлюлозно-бумажного комбината, единственного мощного промышленного предприятия Южного Байкала, в настоящее время вычленив из общего потока воздушных загрязнений невозможно. Исследований, направленных на выяснение его роли в воздушном загрязнении прилегающего горного района и торфяников СОЗами, не проводилось. Исследования же узкой прибрежной зоны гг. Байкальск, Слюдянка, пос. Выдрино, проводимые авторами ранее, не показали значительных

концентраций, сколько-нибудь сравнимых с уровнем загрязнения торфяника Выдринский.

Концентрации ПХБ в пробах почв ветроударных склонов превысили (до 500 раз) все ранее установленные величины ПХБ в почвах, отобранных вне Иркутско-Черемховской промзоны [10]. Это обстоятельство является прямым доказательством существования значительного осаждения ПХБ из воздушных масс западного и северо-западного направлений, а также свидетельствует о барьерной роли хр. Хамар-Дабан для дальнейшего переноса СОЗ в сторону Монголии и Китая.

От ветроударных склонов к торфянику происходит резкое увеличение концентраций суммы ПХБ (рис. 2). Концентрации ПХБ в теле самого торфяника изменяются с глубиной в диапазоне от 484 до 100.2 нг/г сухого торфа, что более чем в 5 раз выше найденного для почв горных склонов.

В 1994 г. японскими исследователями [9] отмечалось в поверхностных весенних водах южной котловины оз. Байкал повышенное содержание низкохлорированных ПХБ. Было высказано предположение, что это явление может быть следствием поступления ПХБ с весенними талыми водами хр. Хамар-Дабан. Очевидно, что это предполо-

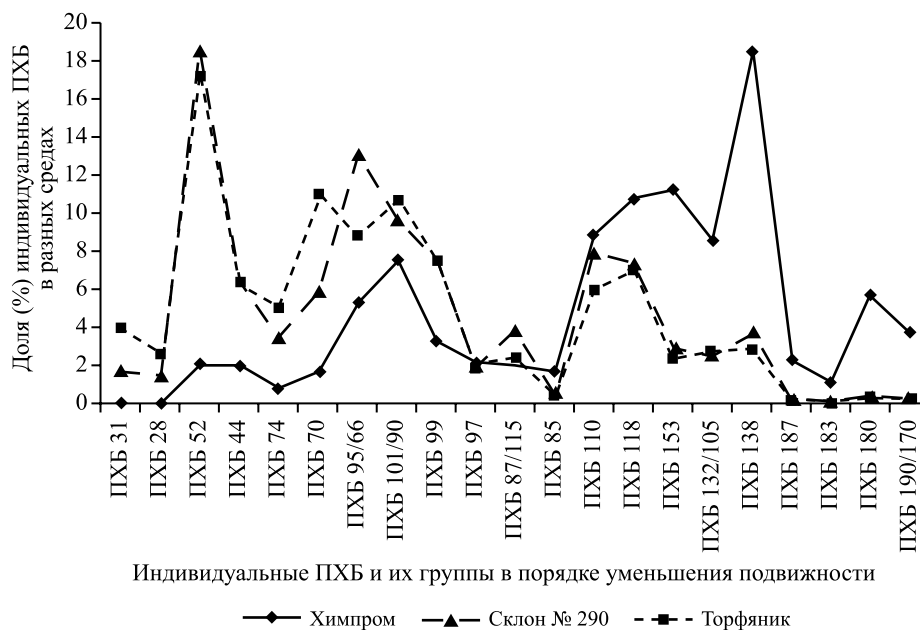


Рис. 1. Процентный состав ПХБ почв источника (химпром г. Усолье-Сибирское), нижней части склона (№ 290) и торфяника Выдринский.

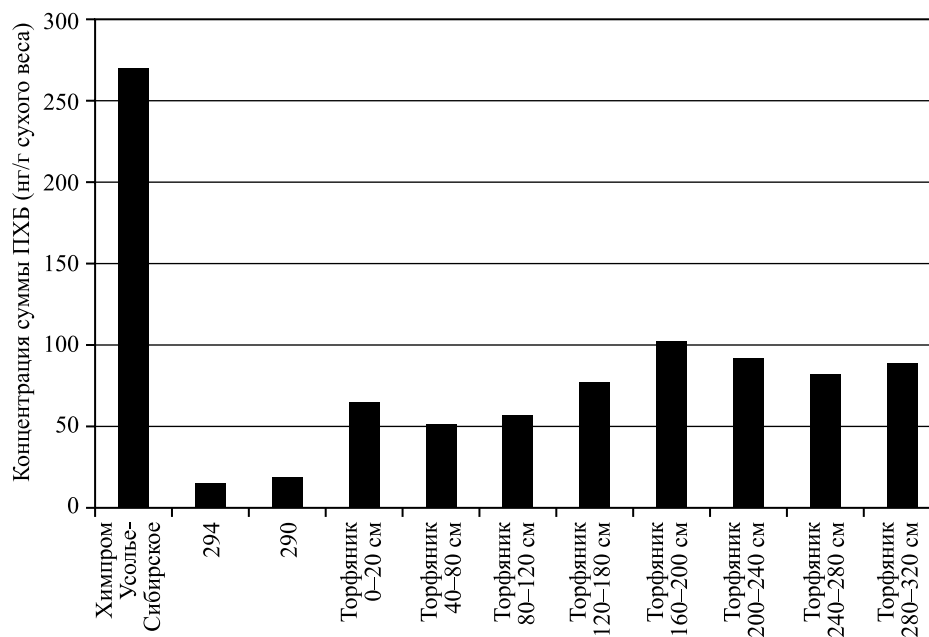


Рис. 2. Концентрации суммы ПХБ источника, почв склона и слоев торфяника Выдринский.

жение верно, а сам процесс поступления ПХБ протекает как в период весеннего таяния снегов, так и в течение всего периода положительных температур.

Склоновый сток с ветроударных склонов хр. Хармар-Дабан, попадая в торфяник предгорной области, являет собой следующую фазу локального природного фракционирования, в результате которого происходит дальнейшее увеличение концентраций ПХБ за счет сорбции в торфянике, обладающем значительно более высоким содержанием органического углерода. Так, если в почвах ветроударного склона, как и в других неравнинных районах, толщина богатого углеродом слоя обычно не превышает 20 см, то в Выдринском торфянике только исследованная верхняя часть керна (3.17 м) полностью состояла из богатых углеродом слоев. С другой стороны, исключительно высокое содержание воды, когда ее уровень достигает нижней зеленой части растительности, является той средой, в которой происходит стабилизация концентраций отдельных соединений во всем теле обводненного торфа (см. рис. 2).

Конгенерный состав проб ветроударного склона и торфяника заметно отличается от состава проб промышленных зон, характеризуемых низким процентным соотношением “тяжелых” ПХБ и сравнительно высоким низкохлорированных, что свидетельствует о значительности эффекта природного локального фракционирования. Конгенерный состав разных слоев самого торфяника

в процентном соотношении остается достаточно стабильным на всю глубину керна. Максимальные концентрации приходятся на ПХБ52 и ПХБ74, 10–14 и 15–18% соответственно, что составляет 7–12 и 8–19 нгПХБ/г сухого веса. Колебания содержания отдельных конгенеров и их групп не превышают 2–4%. Разность составов ПХБ торфяника и почв ветроударного склона незначительна и касается исключительно легких ПХБ28 и ПХБ31. При этом более легкие ПХБ в почвах склона не обнаружены, что, в свою очередь, может говорить о том, что они вымываются дождевым и подземным стоками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследованиях глобального транспорта СОЗ уже общепризнан эффект накопления СОЗ в полярных областях нашей планеты [7]. В настоящей работе показан пример, как в природной среде в средних широтах на фоновых территориях и в пределах локального переноса происходит образование зон вторичного загрязнения.

Ключевые условия этого процесса:

1. Наличие достаточно мощного источника воздушной эмиссии СОЗ.
2. Существование воздушного переноса по розе преобладающих ветров от источника в сторону горного района.
3. Наличие большого водного пространства между источником и зоной конденсации и насыщение

воздушных масс водой, которая становится основной средой переноса СОЗ.

4. Горный массив, преграждающий путь воздушному потоку, должен быть достаточным по высоте, чтобы за счет снижения температуры с высотой произошло выпадение накопленной ранее влаги и большей части частиц взвеси и газовой составляющей полуволетучих соединений.

5. Наличие в долиненной зоне у подножия ветроударных склонов сред с высокой сорбционной емкостью к СОЗ, в частности торфяных болот — природных сорбентов СОЗ.

Торфяные болота побережья оз. Байкал представляют собой мощный накопитель СОЗ. Отсутствии же существенного изменения конгенерного состава свидетельствует о ничтожности вероятных процессов биотрансформации СОЗ в теле торфяника, которые бы могли разрушить токсичные структуры СОЗ. Даже при снижении атмосферного поступления СОЗ торфяники будут работать уже не как накопители, а как источники СОЗ. В итоге практически все накопленные токсиканты неизбежно будут вынесены дождевыми водами в оз. Байкал.

Обнаружение высоких концентраций в непосредственной близости от объекта всемирного наследия, каким является оз. Байкал, делает необходимым организацию и проведение мониторинга содержания СОЗ в этой части Байкальской природной территории.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Байкальского биосферного заповедника за предоставление возможности и оказанную помощь в проведении работ на подведомственной территории.

Исследования выполнены при финансовой поддержке грантов РФФИ № 13-05-00375, № 04-05-64870, № 15-06-00896, № 15-05-01664, проекту НИР VIII.69.1.1 и ИНТАС 00-00140 Интеграционной программы “Фундаментальные исследования и прорывные технологии...”, направление 3, проект 3.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Байкала. М.: Федеральная служба геодезии и картографии России. 1993. 160 с.
2. Афанасьев А.Н. Водные ресурсы и водный баланс бассейна оз. Байкал. Новосибирск: Наука, 1976. 237 с.
3. Мамонтов А.А. Полихлорированные дибензо-пара-диоксины и родственные им соединения в экосистеме озера Байкал. М.: Академия наук о Земле, 2001. 68 с.
4. Полихлорированные бифенилы (ПХБ) в Байкальском регионе: источники, дальний перенос и оценка

риска (результаты гранта INTAS2000-00140) / Отв. ред. М.И. Кузьмин. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2005. 52 с.

5. Теория и практика химического анализа почв. М.: Изд-во ГЕОС, 2006. 400 с.
6. Шарова О.Г., Летунова П.П., Безрукова Е.В., Шетников А.А., Левина О.В., Иванов Е.В. Природные условия развития болотных экосистем Танхойской равнины в голоцене // Вопросы естествознания. 2015. № 3(7). С. 163–166.
7. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP). Oslo, Norway, 1998. 859 p.
8. Daly G.L., Wania F. Organic Contaminants in Mountains // Environ. Sci. & Technol. 2005. V. 39. № 2. P. 385–398.
9. Iwata H., Tanabe S., Ueda K., Tutsukawa R. Persistent organochlorine residues in air water, sediments and soil from the Lake Baikal Region // Environ. Sci. Technol. 1995. V. 29. P. 792–801.
10. Mamontov A.A., Mamontova E.A., Tarasova E.N., McLachlan M.S. Tracing the Sources of PCDD/Fs and PCBs to Lake Baikal // Environ. Sci. & Technol. 2000. V. 34. № 5. P. 741–747.
11. Wania F., Mackay D. The Global Fractionation of Persistent Organic Chemicals: NILU Technical Report; Norwegian Institute for Air Research: Kjeller, Norway, 1996: TR10/96.

REFERENCES

1. Atlas Baikala [Atlas of Lake Baikal], Moscow, Federal'naya Sluzhba Geodezii i Kartografii Rossii, 1993, 160 p. (in Russian).
2. Aphanas'ev, A.N. *Vodnye resursy i vodnyi balans basseina oz. Baikal* [Water resources and water balance of Lake Baikal basin]. Novosibirsk, 1976, 237 p. (in Russian).
3. Mamontov, A.A., Mamontov, A.A. *Polikhlorirovannyye dibenzoparadioksiny i rodstvennyye soedineniya v ekosisteme ozera Baikal* [Polychlorinated dibenzo-para-dioxines and related compounds in the ecosystem of Lake Baikal], Moscow, Akademiya Nauk o Zemle, 2001, 68 p. (in Russian).
4. *Polikhlorirovannyye biphenily (PCB) v Baikal'skom regione: istochniki, dal'nii perenos i otsenka riska (rezul'taty granta INTAS 2000-00140)* [The polychlorinated biphenyls (PCB) in the Baikal region: sources, atmosphere transport and risk assessment (results of the project INTAS 2000-00140)]. Kuz'min, M.I., Ed.-in-Chief, Irkutsk, Izd-vo Instituta geografii SO RAN, 2005, 52 p. (in Russian).
5. *Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv.* [Theory and practice of the chemical analysis of soils] Moscow, GEOS Publ., 2006, 400 p. (in Russian).
6. Sharova, O.G., Letunova, P.P., Bezrukova, E.V., Shchetnikov, A.A., Levina, O.V., Ivanov, E.V. *Prirodnye usloviya razvitiya bolotnykh ekosistem Tankhoiskoi ravniny v*

- golotsene* [Environment conditions of bog ecosystems development of the Tankhoi foothill plain in the Holocene]. *Voprosy estestvoznaniya*, 2015, no. 3(7), pp. 163–166 (in Russian).
7. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP). Oslo, Norway, 1998, 859 p.
 8. Daly, G.L., Wania, F. Organic Contaminants in Mountains. *Environ. Sci. & Technol.*, 2005, vol. 39, no. 2, pp. 385–398.
 9. Iwata H., Tanabe S., Ueda K., Tutsukawa R. Persistent organochlorine residues in air water, sediments and soil from the Lake Baikal Region. *Environ. Sci. Technol.*, 1995, vol. 29, pp. 792–801.
 10. Mamontov, A.A., Mamontova, E.A., Tarasova, E.N., McLachlan, M.S. Tracing the Sources of PCDD/Fs and PCBs to Lake Baikal. *Environ. Sci. & Technol.*, 2000, vol. 34, no. 5, pp. 741–747.
 11. Wania F., Mackay D. The Global Fractionation of Persistent Organic Chemicals: NILU Technical Report; Norwegian Institute for Air Research: Kjeller, Norway, 1996, TR10/96.

SECONDARY ZONES OF LOCAL POLLUTION IN THE SOUTHEAST OF THE BAIKAL NATURAL TERRITORY

A. A. Mamontov*, **E. N. Tarasova***, **E. V. Bezrukova***, **A. A. Shchetnikov****,
E. V. Ivanov*, **E. A. Mamontova***, **M. I. Kuzmin***

* *Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Favorskogo 1A, Irkutsk, 664033 Russia. E-mail: mamontov@igc.irk.ru*

** *Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Lermontova 128, Irkutsk, 664033 Russia. E-mail: shchet@crust.irk.ru*

The investigation shows the case of forming zones of considerable secondary pollution in background areas as a result of local atmosphere transfer. Results of polychlorinated biphenyls (PCB) study within a 20-km-long site of the Khamar-Daban range and the adjacent Vydrinskiy peat bog are presented. This area is considered to be the background; however, it is exposed to the atmospheric impact produced by a strong and multiple PCB source in the Angara industrial center located 150–200 km to the north-west. The peat core and soil were sampled to a depth of 3.17 m and 0.15–0.2 m, respectively. PCB concentrations in peat samples amounted to 48.4–100.2 ngPCB/g dry weight (2480 ngPCB/cm²). PCB level in the soil sampled 2–15 km away of the peat in the direction of prevailing winds (14–18 ngPCB/g dry weight or up to 90 ngPCB/cm²) was extremely high for the coastal soil of Lake Baikal. The total level of PCBs in peat core by the square exceeded by the factor of 2.5 that in the contamination source soils. The congener composition of PCB in peat bog is nearly similar to that on the range slope and differs from that in soil of industrial areas by a higher share of low chlorinated congeners. This phenomenon points to an exclusive impact of atmospheric transport. Concentrations of PCB-52 and PCB-74 were maximal both in peat and soil of Khamar-Daban (10–14 and 15–18%, respectively). The content of other congeners and their groups do not exceed 2–4%. A high content of organic carbon by the entire core depth (C_{org} = 8.86–11.59%) and the peculiarity of the local natural chromatographic processes in mountain area in the south-east of Lake Baikal region are the main reasons of considerable PCB accumulation in the area investigated.

Key words: *Lake Baikal, the polychlorinated biphenyls, soil, peat, air transport.*