

УДК 632.122:711.434

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛИХЛОРИРОВАННЫХ БИФЕНИЛОВ В ПОЧВЕННОМ ПОКРОВЕ Г. СЕРПУХОВА

**© 2010 С.М. Севостьянов, Н.Ф. Деева, А.А. Ильина,
Д.В. Демин, Ю.В. Шульженко**

Институт фундаментальных проблем биологии РАН, г. Пушино

Поступила 12.11.2008

Результаты анализа изменения загрязнения почвенного покрова г. Серпухова полихлорированными бифенилами (ПХБ) за 20-летний период наблюдения. Отмечается увеличение площадей почв с минимальными уровнями загрязнения. Сохраняются территории, приуроченные к бывшим производственным площадям, где содержание ПХБ в верхнем слое почв остается чрезвычайно высоким. Оценена роль рельефа в перераспределении данного поллютанта. Рассчитан градиент содержания ПХБ по линии продольного геоморфологического профиля. Определено, что данная величина зависит от угла наклона и не зависит от уровня загрязнения и длины профиля.

Ключевые слова: загрязнение, стойкие органические загрязнители, полихлорированные бифенилы, морфологический профиль, мониторинг, градиент содержания.

В последние годы большое внимание уделяется анализу группы стойких органических загрязнителей (СОЗ), которые воздействуют на среду обитания на чрезвычайно низком уровне (нижний предел обнаружения 10^{-8} - $10^{-13}\%$). Среди СОЗ полихлорированные бифенилы (ПХБ) являются одними из самых распространенных. Основная масса ПХБ сосредоточена в электрооборудовании – силовых аккумуляторах и трансформаторах, которые присутствуют повсеместно. Взрывы конденсаторных банок, аварии на подстанциях, утечка ПХБ из устаревшего оборудования приводят к разбрызгиванию жидкости на большие расстояния и созданию повсеместных локальных очагов загрязнения – «горячих точек». Критическая ситуация складывается вокруг предприятий по производству данного вещества или использованию его в технологических циклах, расположенных в городской черте, так как воздействию подвергались не только рабочие, но и жители прилегающих кварталов.

Наиболее актуальными являются исследования по оценке загрязнения почв, которые депонируют ПХБ на длительное время (20-40 лет) и служат источником вторичного загрязнения объектов окружающей среды.

По данным белорусских авторов [3], уровни загрязнения верхнего 5-сантиметрового слоя почв на пашне, удаленной от подстанции с конденсаторной батареей на 100 м, превышали 1000 ориентировочно допустимых концентраций (ОДК). Можно предположить, что аналогичная ситуация наблюдается и на территории России. Однако до настоящего времени не проведена оценка состоя-

ния ПХБ-содержащего оборудования, мест его складирования и производства, и, соответственно, нет регулярных наблюдений за уровнями загрязнения почвенного покрова на этих территориях. Имеются данные локального мониторинга по отдельным городам и регионам [4, 11, 12].

Поэтому разработка основ и принципов мониторинга и изучение пространственных закономерностей распределения ПХБ в почвенном покрове – крайне важная и актуальная проблема на сегодняшний день.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Город Серпухов – один из репрезентативных объектов для проведения подобных исследований, так как ПХБ являются приоритетными загрязняющими веществами на данной территории. Источником загрязнения служил НПО «Конденсатор», расположенный в черте города и использовавший в течение 20 лет ПХБ для заполнения конденсаторов со средней нагрузкой 1,4 тыс. т в год. В результате несовершенства технологии и сложности лабораторного контроля в объекты окружающей среды поступило большое количество хлорированных бифенилов.

Город расположен на левом берегу р. Оки в месте впадения в нее р. Нары. Природные условия района исследований характерны для нечерноземного центра Русской равнины. В системе почвенного районирования данная территория относится к Среднерусской провинции дерново-подзолистых среднегумусированных почв. Однако под воздействием антропогенных нагрузок почвенный покров претерпел значительные изменения. Более 76% почвенного покрова представлено искусственно созданными почвами: урбаноэмами, культуросемами, индустриоземами и некроземами [6, 11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Первые исследования (в 1987-1988 гг. – НПО «Тайфун», в 1990 г. – ВНИИ прикладной микробиологии), проведенные по инициативе Центра

Севостьянов Сергей Михайлович, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории функциональной экологии, sevost2000@gambler.ru; *Деева Надежда Филипповна*, старший научный сотрудник той же лаборатории, ndeeva@gambler.ru; *Ильина Алевтина Алексеевна*, научный сотрудник той же лаборатории, khakimov@issp.serpukhov.su; *Демин Дмитрий Викторович*, младший научный сотрудник той же лаборатории, khakimov@issp.serpukhov.su; *Шульженко Юрий Владимирович*, инженер той же лаборатории, khakimov@issp.serpukhov.su.

госсанэпиднадзора г. Серпухова, показали, что содержание ПХБ в верхних слоях почв в районе завода «Конденсатор» составляет десятки и сотни мг/кг, а экстремальные значения достигают до тысяч и десятков тысяч мг/кг. Результаты проведенных исследований послужили основанием для прекращения использования ПХБ в качестве диэлектрика.

В дальнейшем (в 1991- 2007 гг.) Институтом фундаментальных проблем биологии РАН (ИФПБ РАН) и Окским экологическим фондом (г. Пушкино) проводились эколого-геохимические исследования в г. Серпухове, в том числе оценка загрязнения почв ПХБ [2, 9-11].

На основе 20-летних наблюдений по данным более 350 анализов почвенных образцов проведена оценка пространственного распределения, и изменения во времени уровня загрязнения почвенного покрова г. Серпухова. Загрязнение почвенного покрова было связано с переносом ПХБ с пылью, в виде аэрозолей и парогазовой фазы по направлению преобладающих ветров, за счет дискретного поступления с загрязненной тарой. В табл. 1 приведены данные, характеризующие уровни загрязнения почвенного покрова в первые годы после прекращения производства (1991-1992 гг.). Чрезвычайно высокая степень загрязнения почвенного покрова (более 100 ПДК) наблюдалась в районе завода в южной части города и его промбазы на севере. В последующем эти ареалы служат источником ПХБ, которые мигрируют с водными и латеральными потоками на территории с меньшими абсолютными отметками. Между тем, стоит отметить, что по сравнению с первыми исследованиями, проведенными в 1988 г., произошло изменение содержания ПХБ в почвах. Выявлено как снижение, так и увеличение количества ПХБ в слое 0-10 см. Снижение уровня может быть связано как с процессами естественной деструкции и перераспределением по почвенному профилю и рельефу, так и с проведением почвоулучшающих мероприятий (вспашка или перекопка, внесение торфокомпоста, удаление и сжигание растительных остатков). Увеличение относительно изначального уровня, вероятно, вызвано преобладанием поступления ПХБ от источников загрязнения и перераспределения по рельефу над уровнем деструкции. Уровни, не превышающие ПДК, отмечены лишь на окраинных частях города и приурочены в основном к лесопаркам.

Через 20 лет после прекращения производства отмечено, что территории с уровнями загрязнения почвенного покрова, не превышающими ПДК, занимают 74% от площади города (табл. 1). Тем не менее сохраняются два ареала экстремального загрязнения почвенного покрова ПХБ (>100 ПДК), приуроченные к ранее отмеченным источникам.

Однако на данном этапе исследований обнаружены участки, в которых изначальный уровень загрязнения в верхнем слое почв повысился. Данные территории не связаны с поступлением поллютанта от источников; увеличение содержа-

ния ПХБ обусловлено их перераспределением латеральными потоками с положительных форм рельефа в отрицательные.

Особо хочется подчеркнуть, что за весь период наблюдения при максимальной полноте охвата всех типов городской территории не было выявлено ни одной точки, в почвах которой отсутствовал ПХБ. Поэтому в табл. 1 нет графы «незагрязненные территории».

Таблица 1. Динамика загрязнения почвенного покрова ПХБ

Концентрация ПХБ		Площадь, загрязненная ПХБ, км ² (%)	
мг/кг	ПДК	1991 год	2007 год
< 0,06	< 1	11,28 (27)	31,16 (74)
0,06-0,12	1-2	9,44 (23)	3,88 (9)
0,12-0,18	2-3	8,76 (21)	3,63 (9)
0,18-0,24	3-4	3,03 (7)	1,98 (5)
0,24-0,30	4-5	2,49 (6)	0,82 (2)
> 0,30	> 5	6,9 (16)	0,43 (1)

На основе модельных экспериментов и литературных данных проанализирован вклад отдельных составляющих экосистем в деструкцию и трансформацию ПХБ. Особое внимание уделено влиянию рельефа на перераспределение ПХБ в пространстве.

Чтобы оценить естественное разложение ПХБ в почве без учета фактора перераспределения, нами были выбраны участки на плоских водоразделах, расположенные вдали от источников загрязнения, где отсутствует эрозионный смыв вниз по склону, и не ведется хозяйственная деятельность. Сопоставление данных анализов с интервалом отбора проб в 15 лет показало, что естественным путем разложилось около 40% содержащегося в почве хлорорганического поллютанта. Данная цифра согласуется с литературными данными о периоде полураспада ПХБ [7, 8].

Аэральный перенос поллютанта вносил существенный вклад в загрязнение территории при функционировании завода «Конденсатор». Миграция ПХБ с воздушными потоками преобладала в северо-восточном и юго-восточном направлениях. С закрытием завода доля аэрного переноса ПХБ заметно снизилась и не оказывает влияния на загрязнение территории.

Для почв с отсутствием привноса ПХБ наблюдается максимальная концентрация поллютанта в верхнем горизонте и постепенное снижение вниз по профилю.

Механизмы миграции ПХБ в зависимости от рельефа изучены слабо. Наряду с самым упрощенным представлением о смыве загрязнителя с положительных форм и концентрации его в отрицательных, особенно замкнутых, формах земной поверхности (или об увеличении концентрации ПХБ от элювиальных к супераквальным геосистемам, а также на границах склоновых и пойменных геосистем) более определенных оценок перераспределения ПХБ путем морфодинамического анализа не делалось. Поэтому предпринята попытка оценить влияние рельефа на пространственное перераспределение ПХБ и установить за-

кономерности формирования латеральной составляющей экспозиции ПХБ на местности. Сложность оценки латеральной миграции обусловлена двумя главными причинами: одновременным участием вещества в вертикальных и латеральных процессах (трудностью отделения первого от второго) и неоднородностью структуры (почвенного покрова, угодий) по простиранию склона. Отсюда выявленные закономерности не имеют однозначных коэффициентов корреляции с морфометрическими характеристиками.

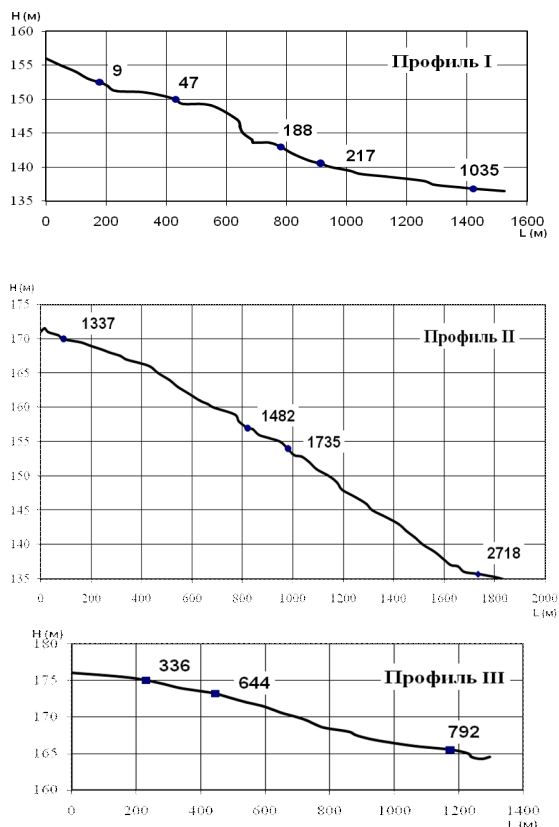


Рис. Распределение концентраций ПХБ (мкг/кг) в верхнем слое почв (0-10 см) по простиранию продольных профилей. Профиль 1 : угол наклона (α) = $1,37^\circ$, профиль 2 : $\alpha = 1,34^\circ$, профиль 3: $\alpha = 0,76^\circ$

Для изучения латеральной миграции ПХБ был построен ряд профилей. Принцип построения: профиль поверхности строили исходя из наличия достаточного числа точек по направлению латерального потока. Профили строились с использованием топографической карты М 1:5000 с сечением горизонталей через 1 м. На линии профиля отмечалось местоположение точек отбора почвенных образцов (0-10 см) и содержание в них поллютанта.

Приведём три профиля, с наибольшей наглядностью характеризующих изменением концентрации ПХБ вниз по склону (рисунок). На профилях, в зависимости от его геоморфологической целостности, представлены зоны выноса - водораздел и верхняя часть склона, с которого происходит перенос материала латеральными потоками, транзита – непосредственно сам склон, и аккумуля-

ляции – подножие склона, котловина, где накапливается загрязняющие вещества. Длины профилей составляли 800-1900 м, уклон $0,76 - 1,37^\circ$.

Приводимые профили имеют сходное геоморфологическое строение, нет дополнительного поступления ПХБ с боковыми потоками, отсутствуют промежуточные зоны аккумуляции. Представленные территории характеризуются минимальной антропогенной нагрузкой.

Для представленных профилей был рассчитан градиент содержания ПХБ ($\text{grad}C$), который равен разности в содержании элемента (С) между двумя точками, отнесенной к единице расстояния (L) [1].

При разных изначальных уровнях концентрации ПХБ для двух профилей с одинаковым уклоном градиент содержания одинаков ($0,8 \text{ мкг/м}$), уменьшение уклона приводит к прямо пропорциональному уменьшению переноса ПХБ (табл. 2). При пересчете градиентов содержания трех профилей для уклона в 1° получены сходные результаты (среднее – $0,6 \text{ мкг/м}$). Таким образом, градиент содержания в первую очередь зависит от угла наклона профиля. Уровни загрязнения на водоразделе и в понижении, а также длина склона не влияют на данную величину переноса.

Тем не менее, не стоит делать выводы о прямо пропорциональной зависимости между уклоном и градиентом содержания при больших углах.

Подобная закономерность позволяет предположить, что в миграции латеральными потоками участвует определенное количество ПХБ, сорбированного на почвенных частицах и растворенного в воде. Данная цифра не зависит от исходной концентрации поллютанта.

При отсутствии дополнительного привноса ПХБ общее увеличение концентрации поллютанта происходит вниз по простиранию склонов.

Нарушения ряда по тренду могут происходить локально на вогнутых и выпуклых элементах профиля, что связано с изменением скорости перераспределения поллютанта. В локальных вогнутых участках склона скорость миграции снижается и происходит накопление ПХБ, в локальных выпуклых участках скорость миграции увеличивается, и концентрация ПХБ снижается.

При рассмотрении миграции загрязнителя вниз по склону необходимо учитывать влияние боковых латеральных потоков: они могут, как увеличивать содержание поллютанта (при слиянии), так и уменьшать (при рассеивании). Таким образом, в процессе перераспределения ПХБ по склону может изменяться вектор потока в точках бифуркации и слияния.

Выявленные в смежных науках о земле (эрозия почв) закономерности указывают на влияние угла наклона на перенос вещества по следующим градиентам: $0-2^\circ$, $2-5^\circ$, $5-8^\circ$, $>8^\circ$. Количественные показатели смыва почвы (с учетом типа угодий) различаются в 5-10 раз [5].

Таблица 2. Градиент содержания ПХБ в почвах (0-10 см)

№ профиля	L (м)	Угол наклона (α^0)	C на водоразделе (мкг/кг)	C в зоне аккумуляции (мкг/кг)	ΔC (мкг/кг)	grad C (мкг/м)	grad C при $\alpha = 1^0$ (мкг/м)
I	1240	1,37 ⁰	9	1035	1026	0,82	0,59
II	1665	1,34 ⁰	1337	2718	1381	0,83	0,62
III	1000	0,76 ⁰	336	792	456	0,45	0,59

ВЫВОДЫ

После закрытия производства с использованием в технологическом цикле ПХБ в почвах протекают процессы как естественного разложения данного соединения за счет микробиологической деструкции, испарения, отторжения с растительностью, так и перераспределения латеральными потоками по элементам рельефа. За 15-летний период в поверхностном слое почв разложилось около 40% ПХБ. Площади почв с минимальными уровнями загрязнения (ниже 1 ПДК) увеличились с 27% до 74% от территории города. При этом, сохраняются два очага загрязнения, приуроченные к бывшим производственным площадям.

При отсутствии привноса ПХБ на водоразделе общее увеличение концентрации поллютанта наблюдается вниз по простиранию склонов.

Рассчитан градиент содержания ПХБ по линии тока при малых углах наклона для территорий с минимальной антропогенной нагрузкой. Выявлено, что градиент концентрации прямо пропорционален углу наклона профиля и не зависит от концентрации ПХБ в верхнем слое почв и длины склона.

Анализ латеральной дифференциации ПХБ в поверхностном слое почв является составной частью мониторинга диоксиноподобных соединений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геологический словарь. М.: Недра, 1978. Т. 1. 486 с.

- Ильина А.А., Деева Н.Ф., Севостьянов С.М., Демин Д.В. Оценка степени загрязнения почв полихлорированными бифенилами (ПХБ) во времени // Экологич. состояние природной среды и науч.-практич. аспекты современных мелиоративных технологий. Рязань. 2006. С. 424-427.
- Кухарчик Т.И., Какарека С.В., Хомич В.С., Курман П.В., Воронай Е.Н. Полихлорированные бифенилы в почвах Белоруссии: Источники, уровни загрязнения, проблемы изучения // Почвоведение 2007. № 5. С. 532-540.
- Ливанов Г.А., Худолей В.В., Колбасов С.Е. Основные источники диоксиноподобных соединений класса полихлорированных бифенилов в Санкт-Петербурге и Ленинградской области, их уровни и пути миграции // Полихлорированные бифенилы. Супертоксиканты 21 века. Информ. вып. № 5. М. 2000. С. 70-86.
- Моделирование эрозионных процессов на территории малого водосборного бассейна / Под ред. А.С. Керженцева, Р. Майснера.- М.: Наука, 2006. – 224 с.
- Почва, город, экология / Под общей ред. Г.В. Добровольского. – М.: Фонд «За экономическую грамотность», 1997. - 320 с.
- Тинсли И. Поведение химических загрязнителей в окружающей среде. М.: Мир, 1982. 281 с.
- Фоновый мониторинг загрязнения экосистем суши хлорорганическими соединениями / Под ред. Ф.Я. Ровинского Л.: Гидрометиздат. 1990. 269 с.
- Хакимов Ф.И., Деева Н.Ф., Ильина А.А. Загрязнение полихлорированными бифенилами почв города Серпухова // Почвоведение. 2003. № 4. С. 493-498.
- Хакимов Ф.И., Деева Н.Ф., Ильина А.А. Почвы промышленного города: трансформация и загрязнение // Ecology and Noospherology. 2006. Vol. 17. No 1-2. P. 24-40.
- Экологическая ситуация в городе Серпухове и перспективы ее улучшения / под ред. Ф.И. Хакимова, А.Ю. Поповой, А.С. Керженцева М.: ПОЛТЕКС, 2000. 228 с.
- Wilcke W., M. Krauss, G. Safronov, A. Fokin, M. Kaupenjohann. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in soils of the Moscow region: Concentrations and small-scale distribution along an urban-rural transect // Environmental Pollution. 2006. Vol. 141. P. 32- 335.

SPATIALLY-TEMPORAL FEATURES OF POLYCHLORINATED BIPHENYLS DISTRIBUTION IN TOPSOIL OF SERPUKHOV CITY REGION

© 2010 S.M. Sevost'yanov, N.F. Deeva, A.A. Il'ina, D.V. Demin, Yu.V. Shul'zhenko

Institute of Basic Biological Problems of RAS, Puschino

In this article the analysis of soil contamination with polychlorinated biphenyls (PCB) in Serpukhov city region based on 20 years of supervision is presented. It was estimated that areas of soils with lowest contamination levels were expanded. There were still revealed extremely high concentrations of PCB in soils located in the territories of former industrial areas. The dependence of pollutant distribution on relief characteristics was analyzed. The gradient of PCB concentration in the longitudinal geomorphologic profile was calculated. It was shown that this value is dependent on the slope angle and is not dependent on contamination level and length of a profile.

Key words: contamination, persistent organic pollutants, polychlorinated biphenyls, geomorphologic profile, monitoring, gradient of PCB concentration.

Sevost'yanov Sergey Mikhailovich, candidate of Biology, leading research worker of laboratory of functional ecology, sevost2000@rambler.ru. *Deeva Nadezhda Filippovna*, senior research worker of the laboratory, ndeeva@rambler.ru; *Il'ina Alevtina Alekseevna*, research worker of the laboratory, khakimov@issp.serpukhov.su; *Demin Dmitry Victorovich*, junior research worker of the laboratory, khakimov@issp.serpukhov.su; *Shul'zhenko Yuri Vladimirovich*, the laboratory engineer. khakimov@issp.serpukhov.su.