
ОЦЕНКА ТОКСИЧНОСТИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЛИХЛОРИРОВАННЫМИ БИФЕНИЛАМИ ПОЧВ ДЛЯ ВЫСШИХ РАСТЕНИЙ

Ю.И. Баева, Н.А. Черных

Экологический факультет
Российский университет дружбы народов
Подольское шоссе, 8/5, Москва, Россия, 115093

Дана оценка качества загрязненных полихлорированными бифенилами почв г. Серпухова как среды обитания растений методом биотестирования с помощью интегрального показателя, основанного на угнетении роста, развития и размножения высших растений.

Ключевые слова: загрязнение почв, полихлорированные бифенилы, растения, фитотоксичность, биоаккумуляция

Полихлорированные бифенилы (ПХБ) — группа органических соединений, относящихся к классу ароматических, химически инертных хлорированных углеводородов, включающая в себя все хлорзамещенные производные дифенила [4].

Химическая инертность, малая летучесть, негорючесть, высокая диэлектрическая константа обеспечили ПХБ широкое распространение в промышленности [2]. Впервые они стали производиться в 1929 г. в США и широко использовались в Японии, СССР, Восточной и Западной Европе до 1970 г. [9]. Около 60% ПХБ применялись в закрытых системах, связанных с переносом тепла и электроэнергии, 25% как пластификатор, в частности при производстве прозрачной копировальной бумаги, и менее 5% при производстве пестицидов [8]. В настоящее время открытое применение их запрещено, но достаточно большое количество ПХБ содержится в крупногабаритном оборудовании с длительным сроком использования (трансформаторы, конденсаторы).

В соответствии с экспертными оценками из-за такого долгого и масштабного использования 35% всего произведенного объема ПХБ оказалось в окружающей природной среде [13] и в настоящее время обнаруживается практически повсеместно. Так, фоновое загрязнение атмосферного воздуха в различных странах мира колеблется на уровне нескольких нанограмм на кубический метр. Загрязненность поверхностных вод изменяется от нескольких нанограмм до 500 нг/л в промышленных регионах [9]. В почвах центральных областей России среднее содержание ПХБ составляет 0,2 нг/кг [3]. Как правило, значительные превышения ПДК наблюдаются вблизи ПХБ производящих и использующих предприятий [7], например, в почвенном покрове г. Серпухова Московской области (ОАО «Серпуховский конденсаторный завод “КВАР”») значение данного показателя колеблется от 0,13 мг/кг до 1836 мг/кг [1].

Благодаря физико-химической инертности ПХБ и аккумулялирующей способности почвы накопленные в ней загрязнители могут представлять опасность для наземных экосистем в течение долгого времени. Период полураспада ПХБ в по-

чвах в среднем составляет около 20 лет. Их миграционная активность во многом зависит от климатических условий, физических, химических и биологических свойств почвы, ее ландшафтно-геохимического положения, при этом загрязнители преимущественно концентрируются на органогенных и иллювиальных горизонтах [11].

Для оценки качества почвы как среды обитания растений применяют интегральный показатель, основанный на угнетении роста и развития высших растений загрязняющими веществами и токсинами, находящимися в почве, — фитотоксичность. Фитотоксичность проявляется в виде общего хлороза растений, в пожелтении, скручивании кончиков и краев листьев, стеблей и других частей растения, в отставании растений в росте, высыхании, отсутствии всходов и других показателях, наблюдаемых при визуальном обследовании, что и определяет ее широкое использование в методах биоиндикации.

Все вышесказанное обусловило цель нашего исследования: определение степени токсичности почв с различным содержанием ПХБ для высших растений методом биотестирования.

Материалы и методы исследования

Оценка качества загрязненных ПХБ почв г. Серпухова проводилась по методике «ГОСТ Р ИСО 22030-2009 Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений» в лаборатории экологического факультета РУДН. В качестве тест-объектов использовались два вида растений — редька масличная (*Brassica rapa*) и овес посевной (*Avena sativa*). Исследуемые почвы отбирались с участков, расположенных на различном удалении от «Серпуховского конденсаторного завода “КВАР”» (250, 500, 1000 м) и характеризующихся различной степенью хронического загрязнения ПХБ. В качестве контрольного субстрата использовались референтные пробы почвы с незагрязненных участков (10 000 м от завода), свободные от загрязняющих веществ, сходные с исследуемыми почвами по механическому составу, показателю рН и содержанию питательных веществ.

Количественное определение полихлорированных бифенилов в почвах и биомассе растений проводилось с помощью метода газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ МС) на хромато-масс-спектрометре Thermo Focus DSQ II на базе Центра коллективного пользования РУДН. Подготовка образцов для анализа осуществлялась с помощью ускоренной экстракции растворителем (Accelerated Solvent Extraction — ASE) [6]. Идентификацию ПХБ осуществляли путем сравнения масс-спектра (в режиме полного ионного тока) и на основании определенных в результате анализа стандартного образца смеси «Арохлор 1254» индексов удерживания Ковача для используемой в анализе капиллярной колонки. Для количественного определения ПХБ в качестве внутреннего стандарта использовался 4,4-дибромбифенил [5].

Обсуждение результатов

Проведенные нами химико-аналитические исследования содержания полихлорированных бифенилов в почвенном покрове г. Серпухова на различном рас-

стоянии от конденсаторного завода показали, что максимальное загрязнение приурочено к территории, непосредственно прилегающей к производственной площадке. Здесь суммарная концентрация ксенобиотиков превышает значение ПДК в 47 раз. Уровни, не превышающие ПДК, отмечаются уже на расстоянии 0,5 км от завода — 0,04 ПДК. А зарегистрированное нами минимальное содержание ПХБ, не имеющее достоверных различий с фоном, наблюдалось в точках, расположенных в 1 км от промзоны в парке им. Олега Степанова — 0,02 ПДК.

В настоящее время в мониторинге загрязнения окружающей среды все чаще используются методы биодиагностики, неоспоримым плюсом которых в отличие от химико-аналитических методов, дающих информацию только о количественном содержании загрязняющих веществ в компонентах биосферы без учета его приемлемости для живых организмов, является непосредственное отражение негативного воздействия на биоценозы [12; 16]. При этом широко используются как «пассивные» методы — биоиндикация, так и «активные» — биотестирование, основанные на оценке достоверных различий между ответными реакциями тестируемого объекта в контроле и опыте [10; 14; 15].

Оценка хронической фитотоксичности почв, загрязненных ПХБ, в нашем исследовании основывалась на определении параметров прорастания, вегетационного роста и способности к размножению. При этом оценивались такие показатели, как количество появившихся всходов, число живых растений, длина побегов и биомасса растений на 14-й день испытания, число живых растений, длина их надземной части и биомасса в конце испытания, число цветов (*Avena sativa*) и число стручков (*Brassica rapa*) на растении в конце испытания.

Содержащиеся в почвах ПХБ влияют на энергию прорастания овса и редьки даже в концентрациях, не превышающих ПДК (рис. 1). Так, при содержании контаминантов в почвенных образцах в концентрации 47 ПДК всхожесть семян *Avena sativa* и *Brassica rapa* достоверно снизилась по сравнению с контролем на 69% и 77% соответственно ($p < 0,05$), при низких концентрациях (0,04 ПДК) снижение данного показателя составило 17% как для овса, так и для редьки масличной.

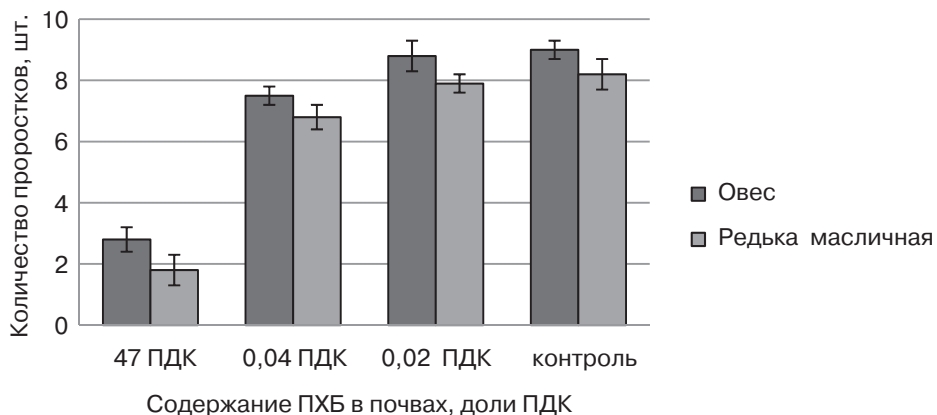


Рис. 1. Количество появившихся всходов овса посевного (*Avena sativa*) и редьки масличной (*Brassica rapa*)

Двудольные растения более чувствительны к органическому загрязнению почв. Так, при концентрациях ПХБ на уровне 47 ПДК число живых растений редьки масличной на 14-й день опыта составило лишь 76,7% от общего количества проросших растений, а количество пожелтевших побегов — 31,1% (контроль — 96,8% и 2,8% соответственно), в то время как гибели и плохого состояния побегов овса не наблюдалось. В конце испытания количество живых растений *Brassica rapa* составило лишь 50,3% (контроль — 89,5%), а количество пожелтевших растений достигло 65,7% (контроль — 10,6%). Также отмечалась гибель *Avena sativa* — число выживших растений составило 78,3% (контроль — 91,7%).

Загрязнение почв ПХБ негативно влияет на параметры роста высших растений. Так, в сосудах с почвами, отобранными непосредственно у конденсаторного завода, длина побегов овса и редьки масличной на 14-й день опыта достоверно снизилась по сравнению с контрольными значениями — в 2,4 и 2,1 раза соответственно ($p < 0,05$), а при содержании ПХБ 0,04 ПДК такое снижение составило 1,4 раза (рис. 2).

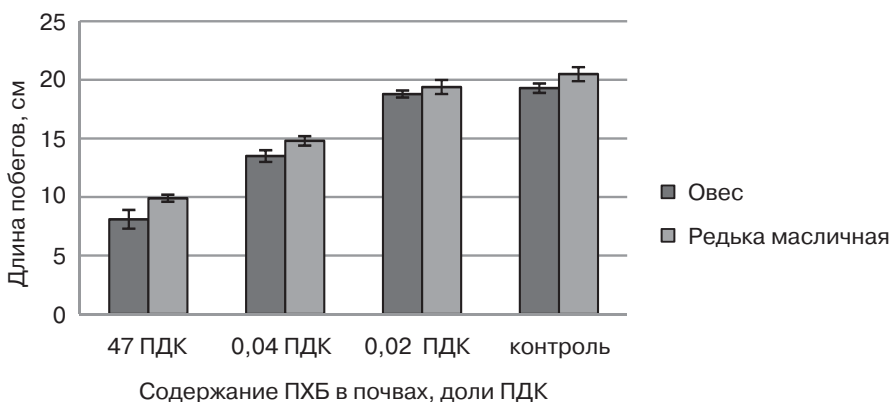


Рис. 2. Длина побегов овса посевного (*Avena sativa*) и редьки масличной (*Brassica rapa*) на 14-й день испытаний

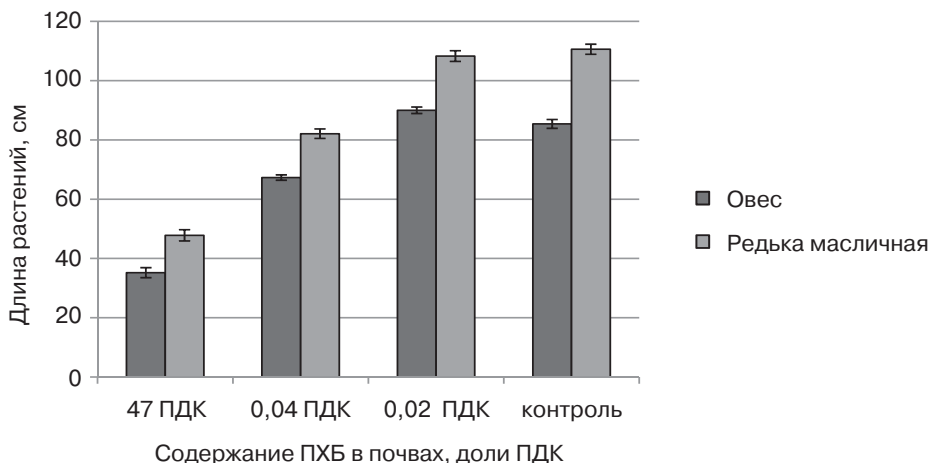


Рис. 3. Длина побегов овса посевного (*Avena sativa*) и редьки масличной (*Brassica rapa*) в конце испытания

В конце испытания отмечалась аналогичная картина (рис. 3): длина наземной части овса и редьки масличной по сравнению с контролем достоверно снизилась при уровне загрязнении почв в 47 ПДК в 2,4 и 2,3 раза, при 0,04 ПДК — в 1,3 и 1,4 раза соответственно ($p < 0,05$).

На фоне снижения длины побегов произошло и снижение общей биомассы проростков. Так, при содержании ПХБ в почвах 47 ПДК масса наземной части растений *Avena sativa* на 14-й день опыта достоверно снизилась в 2,3 раза, а *Brassica rapa* — в 1,9 раза ($p < 0,05$) по сравнению с контрольными сосудами. При низких концентрациях ПХБ (0,04 ПДК) достоверное снижение отмечено в 1,7 и 1,3 раза соответственно для овса посевного и редьки масличной.

В конце испытания масса *Avena sativa*, выращенного на почвах с содержанием ПХБ 47 ПДК, достоверно ниже контрольных значений в 2,2 раза, а *Brassica rapa* — в 1,7 раза. При концентрации в почвах 0,04 ПДК биомасса растений также ниже контрольных значений в 1,3 раза для овса посевного и в 1,2 раза для редьки масличной ($p < 0,05$).

Загрязнение почв ПХБ негативно влияет на способность высших растений к размножению. Так, на рис. 4 видно, что при высоком содержании контаминантов в почве репродуктивная способность *Avena sativa* достоверно снижается в 2 раза, а *Brassica rapa* — в 3 раза по сравнению с контрольными значениями. При низких концентрациях также отмечено достоверное подавление способности к размножению у *Avena sativa* в 1,3 раза, у *Brassica rapa* в 1,5 раза относительно контроля ($p < 0,05$).

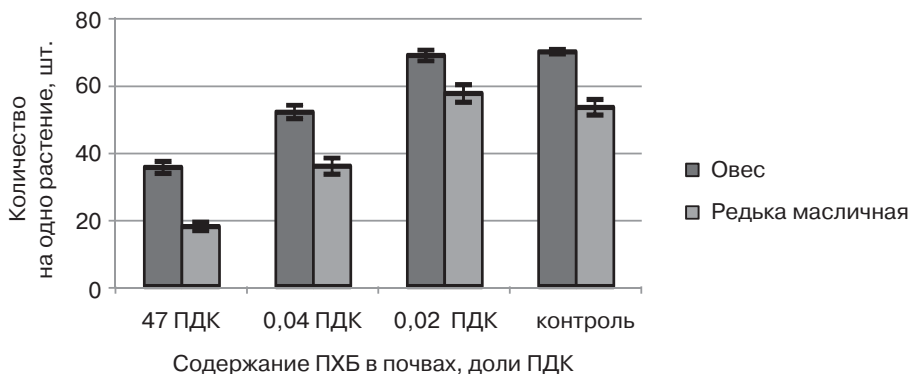


Рис. 4. Количество цветков овса посевного (*Avena sativa*) и стручков редьки масличной (*Brassica rapa*) в конце испытания

Таким образом, оценка качества почвенного покрова г. Серпухова как среды обитания растений показала, что загрязненные почвы проявляют выраженную хроническую фитотоксичность для высших растений даже при содержании полихлорированных бифенилов в концентрациях намного ниже ПДК. При этом достоверно уменьшается энергия прорастания семян, сокращается длина наземной части и, соответственно, биомасса растений, снижается репродуктивный потенциал. Кроме того, на почвах в обследуемых районах г. Серпухова, нежелательно выращивать двудольные растения, которые проявляют большую чувствительность к органическому загрязнению.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бобовникова Ц.И., Хакимов Ф.И., Попова А.Ю. и др. Влияние конденсаторного завода на загрязнение окружающей среды г. Серпухова полихлорированными бифенилами // Полихлорированные бифенилы: Супертоксиканты XXI века. 2000. № 5. С. 87–103.
- [2] Гибсс Л.М. Правда о диоксинах. Иркутск, 1998.
- [3] Диоксин. Гигиенические аспекты. Информационное письмо Минздрава СССР. М., 1990.
- [4] Кабилов Р.Р., Сагитова А.Р., Суханова Н.В. Разработка и использование многокомпонентной тест-системы для оценки токсичности почвенного покрова городской территории // Экология. 1997. № 6. С. 408–412.
- [5] Клюев Н.А. Масс-спектрометрический анализ смесей полихлорированных дифенилов с различной степенью хлорирования // Журнал аналитической химии. 1990. Т. 45. № 10. С. 1994–2003.
- [6] Клюев Н.А. Определение полихлорированных бифенилов в окружающей среде и биоте // Полихлорированные бифенилы: Супертоксиканты XXI века. 2000. № 5. С. 31–63.
- [7] Кухарчик Т.И., Какарека С.В., Хомич В.С. и др. Полихлорированные бифенилы в почвах Белоруссии: источники, уровни загрязнения, проблемы изучения // Почвоведение. 2007. № 5. С. 532–540.
- [8] Лемина О.А. Определение бифенилов в объектах окружающей среды, продуктах питания, технических материалах. URL: <http://www.cgekuban.ru/publication/ilc/bifinil.php>
- [9] Майстренко В.Н. Эколого-аналитический мониторинг стойких органических загрязнителей. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.
- [10] Маячкина Н.В., Чугунова М.В. Особенности биотестирования почв с целью их экотоксикологической оценки // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2009. № 1. С. 84–93.
- [11] Мотузова Г.В., Карпова Е.А. Химическое загрязнение биосферы и его экологические последствия: учебник. М.: Издательство МГУ, 2013. 304 с.
- [12] Терехова В.А. Биотестирование почв: подходы и проблемы // Почвоведение. 2011. № 2. С. 190–198.
- [13] Фёдоров Л.А. Диоксины как экологическая опасность: ретроспектива и перспективы. М.: Наука, 1993.
- [14] Kristen U. Use of higher plants as screens for toxicity assessment // Toxicology in Vitro. 1997. Vol. 11. Iss. 1-2. P. 181–191.
- [15] Persoone G. Recent new microbiotests for cost-effective toxicity monitoring: the Rapidtoxkit and the Phytotoxkit // 12th International Symposium on Toxicity Assessment — Book of Abstracts. 2005. P. 112.
- [16] Sujetoviene G., Griauslyte T. Toxicity Assessment of Roadside Soil Using Wild Oat (*Avena sativa* L.) and Cress (*Lepidium sativum* L.) morphometric and Biochemical Parameters // Environmental Research. Engineering and Management. 2008. № 4 (46). P. 29–35.

ASSESSMENT OF TOXICITY POLLUTED BY THE POLYCHLORINATED BIPHENYLS OF SOILS FOR THE HIGHER PLANTS

Yu.I. Baeva, N.A. Chernykh

Ecological faculty
Peoples' Friendship University of Russia
Podolskoe shosse, 8/5, Moscow, Russia, 115093

The article assesses the quality of soils contaminated with polychlorinated biphenyls Serpukhov as a habitat for plants by bioassay using the integral index, based on the inhibition of growth, development and reproduction of higher plants.

Key words: soil pollution, polychlorinated biphenyls, plants, phytotoxicity, bioaccumulation

REFERENCES

- [1] Bobovnikova C.I., Hakimov F.I., Popova A.Ju. i dr. Vlijanie kondensatornogo zavoda na zagrizajenie okruzhajushhej sredy g. Serpuhova polihlorirovannymi bifenilami [Effect of condenser plant on polychlorinated biphenyls pollution of Serpukhov]. Polihlorirovannye bifenily: Supertoksikanty XXI veka [Polychlorinated biphenyls: supertoxicants of XXI century]. 2000. № 5. S. 87–103.
- [2] Gibss L.M. Pravda o dioksinah [The truth about dioxins]. Irkutsk, 1998.
- [3] Dioksin. Gigienicheskie aspekty [Dioxins. Hygienic aspects]. Informacionnoe pis'mo Minzdrava SSSR [Information letter of the Ministry of health of the USSR]. M., 1990.
- [4] Kabirov R.R., Sagitova A.R., Suhanova N.V. Razrabotka i ispol'zovanie mnogokomponentnoj test-sistemy dlja ocenki toksichnosti pochvennogo pokrova gorodskoj territorii [Development and use of a multi-component test system to evaluate the toxicity of the soil cover of the urban area]. Ekologija [Ecology]. 1997. № 6. S. 408–412.
- [5] Kljuev H.A. Mass-spektrometricheskij analiz smesej polihlorirovannyh difenilov s razlichnoj stepen'ju hlorirovanija [Mass spectrometric analysis of mixtures of polychlorinated biphenyls with varying degrees of chlorination]. Zhurnal analiticheskoj himii [Journal of analytical chemistry]. 1990. T. 45. № 10. S. 1994–2003.
- [6] Kljuev N.A. Opredelenie polihlorirovannyh bifenilov v okruzhajushhej srede i biote [Determination of polychlorinated biphenyls in the environment and biota]. Polihlorirovannye bifenily: Supertoksikanty XXI veka [Polychlorinated biphenyls: supertoxicants XXI]. 2000. № 5. S. 31–63.
- [7] Kuharchik T.I., Kakareka S.V., Homich V.S. i dr. Polihlorirovannye bifenily v pochvah Belorussii: istochniki, urovni zagrizajenija, problemy izuchenija [Polychlorinated biphenyls in soils of Belarus: sources, contamination levels, and problems of studying science]. Pochvovedenie [Soil science]. 2007. № 5. S. 532–540.
- [8] Lemina O.A. Opredelenie bifenilov v obektah okruzhajushhej sredy, produktah pitanija, tehniceskix materialah [Determination biphenyls in the environment, food, industrial materials] Available at: <http://www.egekuban.ru/publication/ilc/bifinil.php>
- [9] Majstrenko V.N. Jekologo-analiticheskij monitoring stojkix organicheskix zagrizajitelej [Ecological and analytical monitoring of persistent organic pollutants]. M.: BINOM. Laboratorija znanij, 2009.
- [10] Majachkina N.V., Chugunova M.V. Osobennosti biotestirovanija pochvs cel'ju ih jekotoksilogicheskaj ocenki [Features bioassay of soil for the purpose of ecotoxicological assessment]. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo [Bulletin of the Nizhny Novgorod University N.I. Lobachevsky]. 2009. № 1. S. 84–93.
- [11] Motuzova G.V., Karpova E.A. Himicheskoe zagrizajenie biosfery i ego jekologicheskie posledstvija [Chemical pollution of the biosphere and its environmental consequences]. M.: Izdatel'stvo MGU, 2013. 304 s.
- [12] Terehova V. A. Biotestirovanie pochv: podhody i problemy [Biotesting soils: Approaches and Problems]. Pochvovedenie [Soil science]. 2011. № 2. S. 190–198.
- [13] Fjodorov L.A. Dioksiny kak jekologicheskaja opasnost': retrospektiva i perspektivy [Dioxins as an environmental hazard: Retrospect and Prospect]. M.: Nauka, 1993.
- [14] Kristen U. Use of higher plants as screens for toxicity assessment // Toxicology in Vitro. 1997. Vol. 11. Iss. 1-2. P. 181–191.
- [15] Persoone G. Recent new microbiotests for cost-effective toxicity monitoring: the Rapidtoxkit and the Phytotoxkit // 12th International Symposium on Toxicity Assessment — Book of Abstracts. 2005. P. 112.
- [16] Sujetoviene G., Griauslyte T. Toxicity Assessment of Roadside Soil Using Wild Oat (*Avena sativa* L.) and Cress (*Lepidium sativum* L.) morphometric and Biochemical Parameters // Environmental Research. Engineering and Management. 2008. № 4 (46). P. 29–35.