

## МЕХАНИЗМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ МАКРОФИТОВ Р. УРАЛ К ТОКСИЧЕСКОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ПОЛИХЛОРИРОВАННЫХ БИФЕНИЛОВ

Соловых Г.Н., Винокурова Н.В.

*ГБОУ ВПО «Оренбургский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации (46000, Оренбург, Советская 6), e-mail: gal.nik.solovix@mail.ru*

По результатам оценки степени защиты макрофитов от воздействия полихлорированных бифенилов установлено, что токсическое действие поллютантов на макрофиты подчиняется теории стресса, но ответная реакция компонентов антиоксидантной защиты растений зависит от дозы токсикантов – «доза-эффект». Выявлен повреждающий эффект действия ПХБ, проявляющийся в снижении содержания пулов зеленых и желтых пигментов и изменении их соотношения: чем выше концентрация ПХБ, тем ниже соотношение суммы хлорофиллов к количеству каротиноидов, что свидетельствует о нарушении производства новых фотосинтетических органелл и их функционировании. По результатам исследования токсического действия ПХБ «построено дерево классификации» и выделены 4 ведущих биохимических показателя, наиболее чувствительных к действию различных концентраций загрязнителей: концентрации хлорофилла *b* и флавоноидов, содержание витамина *C* и антиоксидантная активность.

Ключевые слова: полихлорированные бифенилы; макрофиты, токсическое действие; хлорофилл *a* и *b*, каротиноиды, флавоноиды, витамин *C* и антиоксидантная активность

## MECHANISMS OF ENVIRONMENTAL ADAPTATION OF MACROPHYTES TO THE TOXIC EFFECTS OF POLYCHLORINATED BIPHENYLS IN THE URAL RIVER

Solovykh G.N., Vinokurova N.V.

*State budget educational institution of higher professional education «Orenburg State Medical University» of Ministry of Health of the Russian Federation (46000, Orenburg, 6, Sovetskaya Street), e-mail: gal.nik.solovix@mail.ru*

The assessment of the degree of macrophytes' protection from the effects of polychlorinated biphenyls has shown that the toxic influence of pollutants on macrophytes is subject to the theory of stress, but the response of the components of the plants' antioxidant protection depends on the dose of toxicants, i.e. «dose-effect». The research has identified a damaging effect of PCBs, which manifests itself in lowering the content of pools with green and yellow pigments as well as change in their correlation: the higher the concentration of PCBs is, the lower is the ratio of chlorophyll to carotenoids amount, which indicates a violation of the production of new photosynthetic organelles and their functioning. The obtained results have been used to «construct a classification tree» and describe 4 major biochemical indicators that are most sensitive to various concentrations of pollutants: the concentration of chlorophyll *b*, and flavonoids, vitamin *C*, and antioxidant activity.

Keywords: polychlorinated biphenyls; macrophytes, toxic effects; components of the antioxidant protection of plants; chlorophyll *a* and *b*, carotenoids, flavonoids, vitamin *C*, antioxidant activity

Макрофиты как один из основных компонентов водной экосистемы являются лабильным и уязвимым звеном системы самоочищения воды. Предотвращение антропогенного снижения самоочистительного потенциала рек — одно из условий устойчивого использования ресурсов водных экосистем и биосферы в целом.

Макрофитам свойственна консервативность по отношению к кратковременным изменениям среды, но изменения растительности в течение нескольких лет могут свидетельствовать об антропогенной трансформации водных экосистем. Именно поэтому макрофиты используют как объект для многолетних наблюдений в оценке экологического

состояния водоемов [2].

При действии различных стресс-факторов, в качестве которого выступает и загрязнение ПХБ, в живых организмах происходят изменения на биохимическом уровне: активизируются окислительные процессы. Ответной реакцией макрофитов на увеличение активности свободно-радикального окисления липидов является повышение синтеза антиоксидантов. В результате действия токсикантов в растениях устанавливается определенный баланс между интенсивностью процессов перекисного окисления и антиоксидантной активностью. Этот баланс отражает адаптационные возможности организмов, т.е. приспособленность к изменяющимся условиям среды. Биохимический ответ растительных организмов водной экосистемы как результаты первичной реакции на действие стресс-факторов изучен недостаточно полно и требует более детального исследования в целях разработки наиболее эффективных путей защиты водной экосистемы от загрязнения ПХБ.

**Целью данного исследования** явилась оценка ответных реакций макрофитов на токсическое действие полихлорбифенилов, что определило ряд задач исследования:

1) в модельном эксперименте определить влияние различных концентраций полихлорированных бифенилов на состояние свободно-радикального окисления, антиоксидантную защиту;

2) определить степень воздействия поллютантов на фотосинтезирующий и генетический аппарат макрофитов.

#### **Материал и методы исследования**

В ранних исследованиях [1] нами установлено, что макрофиты интенсивно аккумулируют значительные количества токсикантов, что и определило выбор в качестве объекта исследования биохимических ответов гидробионтов в экосистеме на действия ПХБ именно макрофитов. Для решения поставленных задач использованы модельные эксперименты, на основе которых определяли воздействие различных концентраций ПХБ на макромолекулярном уровне на водные растения (перестройки фотосинтезирующей системы и генетического аппарата, потенциальные возможности защиты растительных организмов на данное воздействие). В качестве тест-объекта использовали доминирующий в р. Урал вид макрофитов — роголистник погруженный (*Ceratophyllum demersum* L.).

Изучение влияния ПХБ на макрофиты проводили с применением классического для токсикологических исследований качества воды подхода с использованием однократных добавок контаминантов [8].

В качестве воздействующего вещества применяли раствор Совола (смесь тетра-, пента- и гекса-ПХБ) в гексане с концентрацией 0,005; 0,001; 0,0012 мг/л. Данные

концентрации соответствовали минимальному, максимальному значению ПХБ в реке Урал [1], а также ПДК данных поллютантов для воды водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. В качестве контроля выступали растения, содержащиеся в воде без добавления токсикантов.

Уровень воды в модельных системах в опытах с однократными добавками поддерживали путем мониторинга (через каждые двое суток) за снижением уровня воды и добавления в аквариумы воды до отметки требуемого уровня.

После периода акклиматизации были взяты пробы из всех аквариумов и проведены определения исходного содержания исследуемых биохимических показателей. Затем в аквариумы были добавлены ПХБ в различных концентрациях. После этого биохимические исследования были проведены через 2, 5, 9, 12 суток.

Степень свободно-радикального окисления определяли по содержанию соединений, реагирующих с тиобарбитуровой кислотой (ТБКРС) [10], об антиоксидантной активности макрофитов судили по их способности ингибировать аутоокисление адреналина *in vitro* и тем самым предотвращать образование активных форм кислорода [7]. В экстрактах определяли активность каталазы [3], массовую долю суммы Р-активных флавоноидов [5], количественное содержание аскорбиновой кислоты [4], хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов [9].

Для моделирования оценки генотоксичности ПХБ использовали два биотеста: для учета видимых мутаций (ВМ) — *Chlorella vulgaris*, хромосомных aberrаций (ХА) в меристеме — *Allium* сера [6].

Для статистической обработки результатов исследований и корреляционного анализа применяли компьютерные программы EXCEL2000 (Microsoft, USA) и Statistika 10.0. Была построена математическая модель зависимости концентрации от значений биохимических показателей *Ceratophyllum demersum* при помощи «Построение деревьев классификации».

В качестве целевой переменной выступала «концентрация ПХБ» (варианты: 0,0 мг/л — контроль; 0,0005 мг/л; 0,001 мг/л; 0,0012 мг/л). Предикторами в построенной модели выступали: активность каталазы, содержание ТБКРС, аскорбиновой кислоты, флавоноидов, хлорофилла *a* и хлорофилла *b*, каротиноидов, антиоксидантная активность.

Определение статистической значимости различий между сравниваемыми параметрами проводилось с расчетом критерия Стьюдента при обязательном выполнении условий нормальности (критерий Колмагорова—Смирнова) в сравниваемых группах и равенства дисперсии (критерий Левина). Пороговый уровень статистической значимости принят при  $p \leq 0,05$ .

### **Результаты исследования и их обсуждение**

По результатам нашего исследования такие стрессовые факторы, как ПХБ, вызывали различные по амплитуде и скорости изменения содержания ТБКРС, а формирование ответной реакции растительного организма зависело от концентрации поллютантов.

Результаты модельных экспериментов показали, что токсическое воздействие ПХБ в концентрациях, равных уровню ПДК и выше, проявляется в нарушениях процесса свободно-радикального окисления в макрофитах, о чем свидетельствуют изменения концентрации ТБКРС в их тканях. Так, в растениях, культивируемых при концентрациях ПХБ, равных ПДК и выше, по истечении эксперимента содержание ТБКРС превышало контроль в 1,6–1,7 раза. В то же время концентрация поллютантов ниже ПДК приводила к снижению ТБКРС в тканях макрофитов в 1,9 раза по сравнению с контролем. Повышение содержания ТБКРС под воздействием концентраций ПХБ, равных или немного превышающих ПДК, свидетельствует о том, что в ответ на воздействие токсикантов растение испытывает стресс и вступает в первичную стрессовую реакцию – реакцию тревоги, проявляющуюся в изменении интенсивности биохимического процесса – свободно-радикального окисления (табл. 1).

**Таблица 1**

Динамические изменения концентрации ТБКРС и в процентах (%) к контролю в *Ceratophyllum demersum* под воздействием различных концентраций ПХБ

Экспозиция, день	Контроль	Вариант опыта (концентрация ПХБ, мг/л)					
		0,0005		0,001		0,0012	
		Концентрация ТБКРС, мкмоль/г	%	Концентрация ТБКРС, мкмоль/г	%	Концентрация ТБКРС, мкмоль/г	%
До внесения ПХБ	15,527±3,38	15,527±3,38	100	15,527±3,38	100	15,527±3,38	100
2	18,194±1,23	15,097±4,19	83,0	22,839±1,37	125,5	9,892±3,45	4,4
5	16,43±2,32	29,183±3,46	177,6	27,957±3,1	170,2	32,129±2,95	95,5
9	14,409±4,69	13,419±2,34	93,1	24,344±2,19	168,9	23,054±1,44	60,0
12	13,462±1,99	7,097±2,32	52,7	22,839±3,16	169,7	21,763±1,89	61,7

Известно, что уровень свободно-радикального окисления липидов в клетке поддерживается постоянным благодаря многоуровневой антиоксидантной системе защиты, а сбалансированность между окислением и антиоксидантной активностью является необходимым условием для поддержания нормальной жизнедеятельности клетки. В связи с этим представляло интерес в лабораторных условиях выяснить особенности изменчивости и функционирования компонентов антиоксидантной защиты макрофитов от воздействия ПХБ.

Полученные данные по изучению активности каталазы в *Ceratophyllum demersum* во временном аспекте при разных концентрациях ПХБ представлены на рисунке 1.

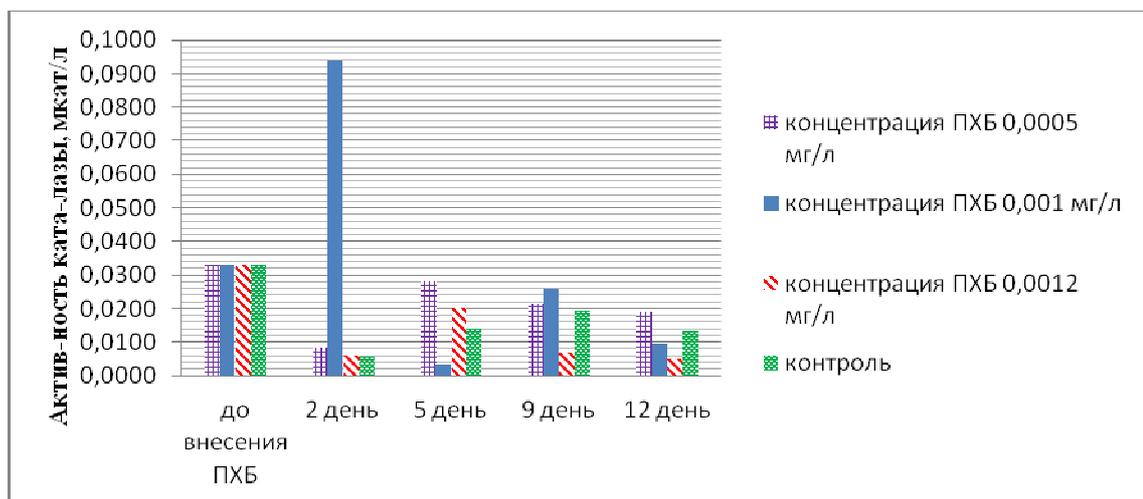


Рис. 1. Активность каталазы *Ceratophyllum demersum* в эксперименте

В наших исследованиях установлено, что разные концентрации ПХБ как стрессовые факторы вызвали различные по амплитуде и скорости изменения активности каталазы, что отличалось от колебаний содержания фермента в контроле, а это свидетельствует о том, что формирование ответной реакции растений на воздействие токсиканта в большей степени зависит не от их токсического воздействия, а от концентрации загрязнителей.

Результаты количественного определения содержания аскорбиновой кислоты в *Ceratophyllum demersum* представлены на рисунке 2.

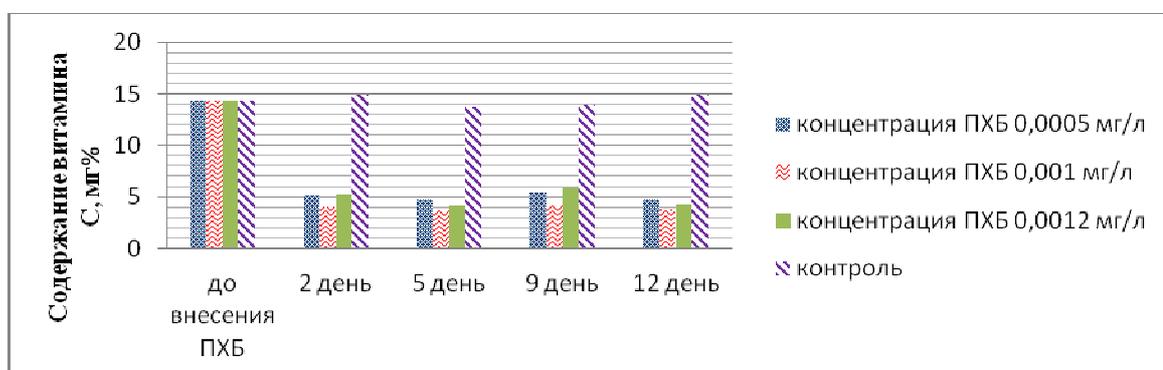


Рис. 2. Динамические изменения содержания аскорбиновой кислоты в экстрактах *Ceratophyllum demersum* в модельном эксперименте

Как видно из представленных данных, содержание биологически активных веществ на примере аскорбиновой кислоты в растениях варьирует в зависимости от дня эксперимента.

Известно, что аскорбиновая кислота выполняет защитную функцию уже на первых этапах образования активных форм кислорода в гидрофильной среде, а уменьшение содержания аскорбата в исследуемом макрофите, возможно, связано с включением защитных механизмов к комплексу неблагоприятных факторов окружающей среды.

Результаты количественного определения суммарного содержания флавоноидов в *Ceratophyllum demersum* во временном аспекте представлены на рисунке 3.

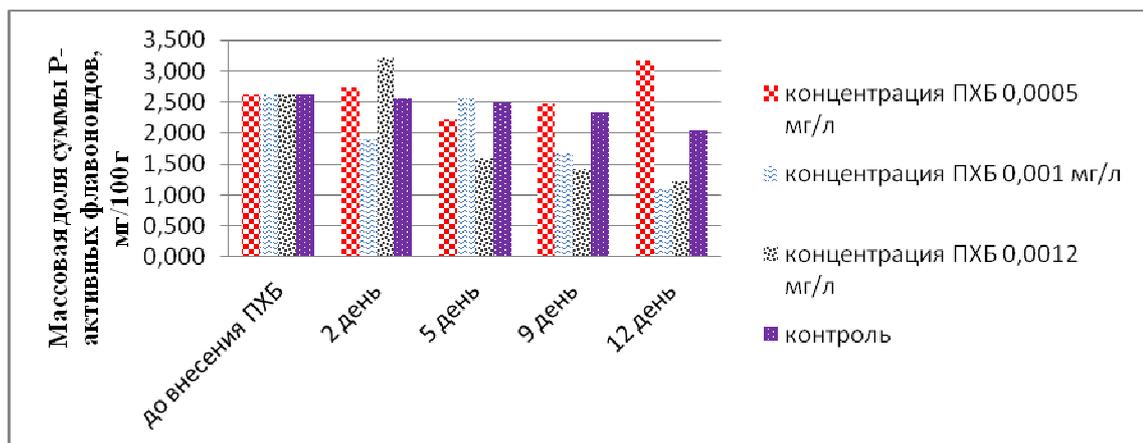


Рис. 3. Динамические изменения массовой доли суммы P-активных флавоноидов в экстрактах *Ceratophyllum demersum* в модельном эксперименте

Результаты модельного эксперимента показали, что только в макрофитах из аквариума с концентрацией ПХБ 0,0005 мг/л на 12-й день эксперимента происходило увеличение содержания флавоноидов в 1,2 раза ( $3,162 \pm 0,04$  мг/100 г) по сравнению с начальным значением ( $2,611 \pm 0,32$  мг/100 г). Вероятно, высокое содержание флавоноидов в растениях вызвано действием воды, загрязненной ПХБ, что привело к активации антиоксидантной системы защиты растения и снижению концентрации конечного продукта свободно-радикального окисления в макрофите.

В то же время в *Ceratophyllum demersum* из аквариумов с более высоким содержанием ПХБ наблюдалось уменьшение данного показателя. Так, из аквариума с концентрацией ПХБ 0,001 мг/л оно составило 2,4 раза, из аквариума с концентрацией ПХБ 0,0012 мг/л – 2,2 раза, в то время как в контрольном аквариуме — 1,3 раза. Возможно, первичный ответ *Ceratophyllum demersum* на загрязнение окружающей среды ПХБ проявился в повышении конечного продукта свободно-радикального окисления Л, в результате чего, по-видимому, срабатывали защитные механизмы, в том числе и флавоноидная система, происходило расходование флавоноидов, что и отразилось на снижении их концентрации в растениях.

В качестве основного показателя, определяющего состояние антиоксидантной системы *Ceratophyllum demersum* под влиянием ПХБ, была использована антиоксидантная активность (АОА).

Расчет антиоксидантной активности показал, что исследуемые растительные экстракты проявляют разные значения показателя в условиях воздействия различных концентраций ПХБ, которые менялись в разные сроки эксперимента (рис. 4).

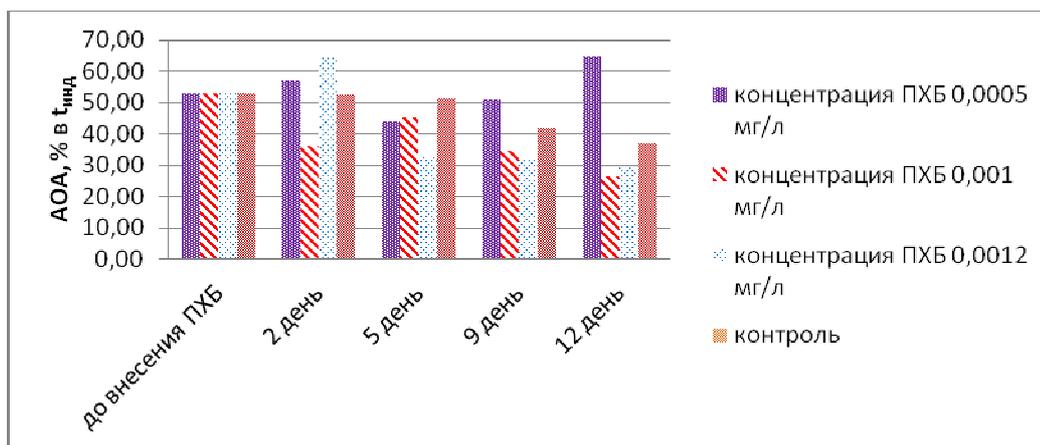


Рис. 4. Динамические изменения антиоксидантной активности экстрактов *Ceratophyllum demersum* в модельном эксперименте

Так, если в начале эксперимента АОА соответствовала 52,96 %, то после добавления ПХБ ее величина варьировала от 26,13 до 64,62 % в разные дни эксперимента.

По истечении модельного эксперимента было показано, что ПХБ в зависимости от концентрации по-разному влияет на АОА экстрактов *Ceratophyllum demersum*. Так, если в контрольной пробе показатель постепенно снижался с 52,96 до 37,10% (снижение составило 1,4 раза), то в образцах, содержащихся в аквариуме с концентрацией ПХБ 0,0005 мг/л (минимальное содержание ПХБ в р. Урал в районе Оренбурга), наблюдалась стимуляция АОА до 64,62% (увеличение составило 1,2 раза). Это подтверждает тот факт, что, по-видимому, *Ceratophyllum demersum* легче приспосабливается к изменяющимся условиям при медленном развитии неблагоприятных факторов, т.е. при очень низкой концентрации поллютантов.

Более высокие концентрации ПХБ (0,001 мг/л — ПДК для воды, 0,0012 мг/л — максимальное содержание ПХБ в р. Урал в районе Оренбурга), наоборот, приводили к более резкому снижению показателя АОА (до 26,13 и 29,0) в 2 и 1,8 раз. В то же время, по нашим результатам, под действием поллютантов с концентрацией 0,001 мг/л и 0,0012 мг/л в конце модельного эксперимента наблюдалось повышение конечного продукта свободно-радикального окисления (ТБКРС), при этом, по-видимому, происходило расходование флавоноидов, их концентрация в растениях снижалась, а вследствие этого уменьшалась и антиоксидантная защита. Таким образом, можно предположить определенную роль активности каталазы, флавоноидов, аскорбиновой кислоты в сохранении макрофитов при токсическом действии ПХБ.

При воздействии экотоксикантов на растения серьезные изменения наблюдаются в строении их клеток и особенно фотосинтезирующего аппарата, так как многие поллютанты концентрируются в клетках (преимущественно в хлоропластах и вакуолях), поэтому огромное значение при исследовании влияния токсикантов на физиологическое состояние

растений имеет изучение пластичности фотосинтетического аппарата, его способности приспосабливаться к изменяющимся условиям среды обитания фитоценоза.

Таблица 2

**Динамические изменения фотосинтезирующих пигментов и каротиноидов  
Ceratophyllum demersum под воздействием различных концентраций ПХБ**

Время взятия проб	Концен- трация ПХБ, мг/л	Содержание пигментов, мг/ г сырой массы				Соотношение пигментов	
		Хлорофилл <i>a</i>	Хлорофилл <i>b</i>	Сумма хл.	Каротиноиды	$\frac{\text{Хл. } a}{\text{Хл. } b}$	$\frac{\text{Хл.}(a+b)}{\text{кар.}}$
До внесе- ния ПХБ	0,0005	0,382±0,002	0,726±0,008	1,108	0,021±0,003	0,526	52,762
	0,001	0,382±0,002	0,726±0,008	1,108	0,021±0,003	0,526	52,762
	0,0012	0,382±0,002	0,726±0,008	1,108	0,021±0,003	0,526	52,762
	контроль	0,382±0,002	0,726±0,008	1,108	0,021±0,003	0,526	52,762
2-й день	0,0005	0,725±0,005	0,405±0,017	1,13	0,01±0,004	1,79	113,0
	0,001	0,69±0,005	0,379±0,008	1,069	0,021±0,003	1,821	50,905
	0,0012	0,388±0,005	0,332±0,012	0,72	0,105±0,003	1,169	6,261
	контроль	0,941±0,008	0,986±0,036	1,927	0,154±0,009	0,954	12,513
5-й день	0,0005	0,288±0,005	0,519±0,003	0,807	0,216±0,002	0,555	3,736
	0,001	0,285±0,005	0,416±0,01	0,701	0,208±0,003	0,685	3,37
	0,0012	0,16±0,001	0,231±0,007	0,391	0,175±0,005	0,693	2,234
	контроль	0,311±0,002	0,558±0,006	0,869	0,218±0,002	0,557	3,986
9-й день	0,0005	0,231±0,007	0,296±0,019	0,527	0,296±0,004	0,78	1,78
	0,001	0,201±0,002	0,21±0,009	0,411	0,266±0,004	0,957	1,545
	0,0012	0,132±0,01	0,19±0,014	0,322	0,145±0,003	0,695	2,221
	контроль	0,318±0,002	0,497±0,01	0,815	0,3 ±0,01	0,64	2,717
12-й день	0,0005	0,169±0,004	0,161±0,012	0,33	0,267±0,004	1,05	1,236
	0,001	0,24±0,003	0,14±0,01	0,38	0,268±0,005	1,714	1,418
	0,0012	0,094±0,004	0,102±0,009	0,196	0,118±0,001	0,922	1,661
	контроль	0,325±0,008	0,476±0,007	0,801	0,303±0,004	0,683	2,644

Проведенный анализ динамических изменений в содержании хлорофиллов *a* и *b* и каротиноидов *Ceratophyllum demersum* показал, что фотосинтетический пигмент хлорофилла *b* значительно более чувствителен к загрязнению ПХБ, нежели хлорофилл *a*. Об этом свидетельствует тот факт, что в течение эксперимента содержание хлорофилла *b* уменьшилось у макрофитов из всех аквариумов с различной концентрацией ПХБ в 1,5–7,12 раз, а хлорофилла *a* — в 1,18–4 раза. В то же время для содержания каротиноидов в *Ceratophyllum demersum* характерно увеличение их концентрации под влиянием загрязнения. Это объясняется тем, что каротиноиды являются наиболее распространенным и активным метаболитом живых организмов, участвующим в системе защиты клеток от воздействия факторов внешней среды.

Эксперимент показал, что произрастание растений в условиях, характеризующихся действием малых концентраций ПХБ в воде, приводило к изменению величины показателя «хл. (a+b)/кар.», что может быть следствием свободно-радикального окисления, степень которого возрастает при окислительном стрессе.

Проведенный нами эксперимент показал, что исследуемые загрязнители, даже в относительно невысоких концентрациях, способны вызывать снижение содержания основных форм фотосинтезирующих пигментов в тканях водного растения. Мы можем предположить, что ПХБ приводят к серьезным нарушениям функционирования пластид, а именно к ингибированию синтеза собственно пигментов и нарушению производства новых фотосинтетических органелл.

В итоге загрязнения водных объектов ПХБ приводит к изменению интенсивности фотосинтеза и дыхания водных растений. Полученные данные о выявленной чувствительности фотосинтезирующих пигментов к действию ПХБ, изменении их соотношения могут быть использованы для диагностической оценки степени и устойчивости растений к действию токсикантов.

Для анализа зависимости исследуемых биохимических показателей (таких как активность каталазы, содержание ТБКРС, аскорбиновой кислоты, флавоноидов, хлорофилла *a* и хлорофилла *b*, каротиноидов, антиоксидантная активность) от концентрации ПХБ был применен метод моделирования: «Построение деревьев классификации», где целевой переменной выступала «концентрация ПХБ» (варианты: 0,0 мг/л — контроль; 0,0005 мг/л; 0,001 мг/л; 0,0012 мг/л). Была последовательно выявлена многомерная зависимость концентрации ПХБ при различных значениях анализируемых биохимических показателей. По графику значимости предикторов для построенной модели мы можем указать, какие биохимические показатели наиболее связаны с различными концентрациями ПХБ. В зависимости от содержания поллютантов в воде выделено 4 ведущих фактора: концентрация хлорофилла *b*, содержание витамина С, антиоксидантная активность, концентрация флавоноидов. Остальные биохимические показатели имели более низкую зависимость и играли второстепенную роль в классификации.

Это подтверждает сделанные выводы о том, что фотосинтетический пигмент хлорофилла *b* значительно более чувствителен к загрязнению ПХБ, нежели хлорофилл *a* и каротиноиды. Выявлена высокая зависимость концентрации аскорбиновой кислоты от содержания поллютантов в воде, что, как показали наши исследования, сопровождалось значительным снижением синтеза витамина. Также показано, что такие показатели, как содержание флавоноидов и антиоксидантная активность, напрямую зависят от концентрации ПХБ.

Предложенная классификация является достаточно качественной, так как прогностическая ценность этой классификации равна 96%, что соответствует отличной точности построенной модели. Проведение тройной кросс-проверки несколько снизило

качество модели. Однако ее прогностическая ценность составила 81%, что свидетельствует о хорошем качестве построенной модели.

В настоящее время генетические процессы, протекающие в водных биосистемах, подвергающихся интенсивному антропогенному воздействию, в том числе ПХБ, исследованы недостаточно. Поэтому актуальными являются генетические исследования живых организмов природных популяций, подверженных антропогенным загрязнениям, и экспериментальный анализ таких воздействий, моделируемых в лабораторных условиях.

Так как нами было показано, что под действием небольших концентраций ПХБ в макрофитах на примере *Ceratophyllum demersum* наблюдается увеличение интенсивности свободно-радикального окисления, на что указывало усиление образования конечного продукта – ТБКРС, которые, как известно, обладают мутагенной активностью и блокируют клеточное деление, вызывало интерес исследовать генотоксическую активность полихлорированных бифенилов в модельном эксперименте.

Используемый в нашем модельном эксперименте набор биологических тестов (*Chlorella vulgaris*, *Allium cepa*) позволил регистрировать генные и хромосомные типы нарушений наследственного материала.

Показано, что различные концентрации ПХБ вызывали видимые мутации (ВМ) у одноклеточной водоросли *Chlorella vulgaris*, наименьшая частота которых ( $0,647 \pm 0,125\%$ ) отмечалась при воздействии минимальной концентрации ПХБ ( $0,0005$  мг/л) в воде реки Урал в районе Оренбурга.

Видимые мутации у *Chlorella vulgaris* ( $1,683 \pm 0,141^*\%$ ) индуцировали ПХБ и в концентрации  $0,001$  мг/л, при этом кратность превышения контроля составила  $12,5$  при  $p=0,01$ , и мутагенная активность при данном воздействии соответствовала «сильному» уровню выраженности. Полихлорированные бифенилы в концентрации  $0,0012$  мг/л также индуцировали ВМ ( $1,375 \pm 0,140^*\%$ ), превышение контроля составило  $10,2$  раза при  $p=0,02$ , что свидетельствует о «сильной» мутагенной активности.

В модельных экспериментах установлено, что генотоксический эффект ПХБ у растений проявляется и в индуцировании хромосомных aberrаций в меристематической ткани *Allium cepa*.

Оценка суммарного индекса мутагенной активности (СИМА) при воздействии различных концентраций ПХБ показала, что наибольшая СИМА=6 регистрировалась в растениях, подверженных влиянию ПХБ в концентрациях  $0,001$  и  $0,0012$  мг/л, а наименьшая СИМА=3 проявлялась при воздействии  $0,0005$  мг/л ПХБ.

Проведенный модельный эксперимент по оценке мутагенной активности различных концентраций ПХБ позволил сделать вывод, что в целом ПХБ, даже в небольших

концентрациях, обладали генотоксичностью по отношению к растительным объектам, а это свидетельствует о том, что в рамках проведения экологического мониторинга водных экосистем необходимо учитывать наличие полихлорированных бифенилов, так как даже в незначительных концентрациях они оказывают повреждающее воздействие на генетический аппарат клеток.

### **Заключение**

Ответная реакция макрофитов на действие ПХБ зависела от концентрации поллютантов и проявлялась в различных по амплитуде и скорости изменениях содержания соединений, реагирующих с тиобарбитуровой кислотой (ТБКРС): ПХБ ниже ПДК (0,0005 мг/л) вызывали активное снижение содержания ТБКРС в растениях по сравнению с исходным и падение интенсивности свободно-радикального окисления. В то же время в растениях, испытывающих воздействие концентраций ПХБ на уровне ПДК и выше (0,001 мг/л и 0,0012 мг/л), зафиксировано возрастание содержания ТБКРС, что свидетельствует об активации процесса свободно-радикального окисления, а значит, и нарушении работы компенсаторно-адаптивного ответа биологической системы макрофитов, но не приводящего к гибели организма на конец эксперимента.

Анализ зависимости исследуемых биохимических показателей (таких как активность каталазы, содержание ТБКРС, аскорбиновой кислоты, флавоноидов, хлорофилла *a* и хлорофилла *b*, каротиноидов, антиоксидантной активности) от исследуемых концентраций ПХБ с использованием метода моделирования: «Построение деревьев классификации», где целевой переменной выступала «концентрация ПХБ» (варианты: 0,0 мг/л — контроль; 0,0005 мг/л; 0,001 мг/л; 0,0012 мг/л), позволил выделить зависимости от содержания поллютантов в воде 4 ведущих факторов: концентрации хлорофилла *b*, содержания витамина С, антиоксидантной активности, концентрации флавоноидов. Остальные биохимические показатели имели более низкую зависимость и играли второстепенную роль в классификации (при уровне прогностической ценности данной классификации 96%).

На модели *Al. сера* установлен генотоксический эффект полихлорбифенилов, который проявлялся в повреждении хромосом и индукции хромосомных aberrаций типа «фрагментов» и «мостов», а также на геномном уровне, в нарушении подвижности хромосом на хроматиновом веретене деления, приводящих к появлению отставаний в процессе расхождения хромосом. ПХБ в различных концентрациях могут выступать в качестве мутагенов прямого действия и вызывать генные мутации.

### **Список литературы**

1. Винокурова Н.В., Соловых Г.Н. К вопросу о роли биологических факторов в процессах самоочищения водной среды природных водоемов от полихлорированных бифенилов // Информационный бюллетень «Здоровье населения и среда обитания». – 2014. — № 8 (257). — С. 23–26.
2. Зуева Н.В. Оценка экологического состояния малых рек Северо-Запада России на основе структурных характеристик сообществ макрофитов: на примере Ленинградской области: автореф. дис. канд. географ. наук: 25.00.36 – Санкт-Петербург, 2007. — 24 с.
3. Королюк М.А., Иванова Л.И., Майорова И.Г. и др. Метод определения активности каталазы // Лаб. дело. – 1988, № 1. – С. 16–19.
4. Кучеренко Н.Е., Бабенюк Ю.Д., Васильев А.Н. и др. Биохимия: Практикум. Киев: Высшая школа, 1988. – 125 с.
5. Лобанова А.А., Будаева В.А., Сакович Г.В. Исследование биологически активных биофлавоноидов в экстрактах из растительного сырья // Химия растительного сырья. — 2004. — № 1. — С. 47–52.
6. Прохорова И.М., Ковалёва М.И., Фомичёва А.Н. Генетическая токсикология: лабораторный практикум. Яросл. гос. ун-т. – Ярославль: ЯрГУ, 2005. – 132 с.
7. Сирота Т.В. Способ определения антиоксидантной активности супероксиддисмутазы и химических соединений // Патент РФ № 2144674 от 20.01.2000
8. Филенко О.Ф. Водная токсикология. — Черноголовка. — 1988. — 156 с.
9. Шлык А.А. О спектрофотометрическом определении хлорофиллов *a* и *b* // Биохимия. — 1968. — Т. 33, вып. 2. — С. 275–285.
10. Costa H., Gallego S.M., Tomaro M.L. Effect of UV-B radiation on antioxidant defense system in sunflower cotyledons // Plant Science 2002, 162(6), 939-945.

#### **Рецензенты:**

Сафонов М.А., д.б.н., профессор, заведующий кафедрой общей биологии, экологии и методики обучения биологии ГБОУ ВПО «Оренбургский государственный педагогический университет», г. Оренбург;

Немцева Н.В., д.м.н., профессор, заведующая лабораторией водной микробиологии Института клеточного и внутриклеточного симбиоза УрО РАН, г. Оренбург.