

УДК 574.635

## БИОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ МАКРОФИТОВ РЕКИ УРАЛ В ПРОЦЕССАХ ОЧИСТКИ ВОДОТОКА ОТ ПОЛИХЛОРИРОВАННЫХ БИФЕНИЛОВ

Соловых Г.Н., Винокурова Н.В., Тихомирова Г.М.

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

Оценка содержания ПХБ в воде, донных отложениях и макрофитах р. Урал. Показаны процессы аккумуляции ПХБ макрофитами, межвидовые различия в их накоплении. Изучена возможность и уровень биоаккумуляции полихлорированных бифенилов макрофитами разных экологических групп. Четкой корреляционной связи между содержанием ПХБ в воде, донных отложениях и макрофитах не выявлено. В период вегетации происходит перераспределение поступающих в водоём загрязнителей между компонентами экосистемы. Выявлен процесс миграции поллютантов в разных компонентах водной среды. Сформулировано практическое предложение в плане усиления процессов биологической очистки водоёмов и водотоков от полихлорированных бифенилов для усиления биологической очистки водоёмов и водотоков путем рекомендации осуществления элиминации фитомассы макрофитов из водных экосистем в осенний период процесса их вегетации.

**Ключевые слова:** вода, донные отложения, макрофиты, полихлорированные бифенилы, аккумуляция

## BIOLOGICAL ROLE MACROPHYTES OF THE URAL RIVER IN THE CLEANING PROCESS WATERCOURSES FROM POLYCHLORINATED BIPHENYLS

Solovykh G.N., Vinokurova N.V., Tikhomirova G.M.

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

An assessment of the content of polychlorinated biphenyls in water, sediments and macrophytes of the Ural River. It shows the accumulation of polychlorinated biphenyls macrophytes interspecies differences in their accumulation. It studied the possibility and the level of bioaccumulation of polychlorinated biphenyls macrophytes of different ecological groups. A clear correlation between the content of polychlorinated biphenyls in water, sediments and macrophytes were not identified. During the growing season redistribution of entering water pollutants between ecosystem components. It identified the migration process of pollutants in different components of the aquatic environment. It is formulated practical proposal in terms of enhancing the processes of biological cleaning of ponds and streams from polychlorinated biphenyls to enhance biological treatment of ponds and streams by recommending the implementation of the elimination of phytomass of macrophytes from aquatic ecosystems in the autumn of their vegetation.

**Keywords:** water, bottom sediments, macrophytes, polychlorinated biphenyls, accumulation

Высшие водные растения благодаря своим морфологическим и экологическим особенностям могут служить биологическим фильтром для поступающих в водоем взвешенных и слаборастворимых органических и неорганических поллютантов [7].

При изучении негативных последствий загрязнения водных экосистем полихлорированными бифенилами (ПХБ) большое значение приобретают исследования взаимосвязи между накоплением и распределением данных поллютантов в компонентах водных экосистем, в том числе и в высших водных растениях, которые живут на мелководьях, не мигрируют, а потому представляют собой удобный объект для наблюдения. По литературным данным исследования с использованием макрофитов в мониторинге токсикантов находятся в стадии накопления информации. Неизученным остается данный вопрос и для р. Урал. Все вышеизложенное и определило цель и задачи нашего исследования.

**Цель данного исследования** – изучить возможности и уровень биоаккумуляции полихлорированных бифенилов макрофитами разных экологических групп и оценить их роль в процессах биологической очистки от данных поллютантов.

### Материалы и методы исследования

Полевые ботанические исследования проводились в период максимального развития растительности – в июне 2013 г. Идентификация макрофитов осуществлялась до вида. Определение растений производилось по определителю [3, 4, 8]. При описании фитоценозов использовались стандартные методики [1, 5].

Суммарное содержание ПХБ в исследуемых образцах макрофитов, воде и донных отложениях определяли хроматографическим методом на хроматографе «Хромос ГХ-1000» на базе испытательной лаборатории Федерального государственного учреждения «Государственный центр агрохимической службы «Оренбургский»». Для оценки содержания ПХБ в макрофитах проводились расчеты коэффициентов биологического поглощения (Кб), коэффициентов специфического относительного накопления.

**Результаты исследования  
и их обсуждение**

Уникальные морфологические и экологические особенности высших водных растений способствуют тому, что они могут выступать биологическим фильтратом при поступлении в водоем взвешенных и слаборастворимых органических и неорганических загрязнений [6].

В последние годы всё острее встаёт вопрос о негативных последствиях поступающих в водные экосистемы таких токсиантов, как полихлорированные бифенилы (ПХБ). При этом наибольшее значение приобретают исследования процессов накопления ПХБ в компонентах водных экосистем, среди которых высшие водные растения из-за отсутствия миграции представляют собой наиболее информативный объект для наблюдения, так как, концентрируя ПХБ в значительных количествах, живут на мелководьях и имеют большой период их полувыведения. Проведенный литературный поиск показал, что мониторинговые исследования с использованием макрофитов находятся в стадии накопления информации. Учитывая вышеизложенное, была поставлена задача изучить содержание ПХБ в воде, донных отложениях и макрофитах

доминантных и субдоминантных видов, характерных для различных станций реки Урал на территории Оренбургской области.

Для решения поставленной задачи в ходе экспедиции 2013 г. был осуществлен забор проб воды и ДО в р. Урал не только в районе Оренбурга, но и на протяжении его среднего течения: на 18 разрезах от Оренбурга до Ириклинского водохранилища (таблица).

В содержании ПХБ в воде и ДО (по российским нормативам) на всех 18 станциях не были установлены превышения ПДК. Максимальная концентрация поллютантов в воде и в ДО была зафиксирована, как и в предыдущие годы исследования, на ст. «Очистные сооружения» в районе Оренбурга ( $0,00081 \pm 0,00022$  и  $0,056 \pm 0,03$  мг/кг соответственно). Наиболее низкие значения ПХБ в воде и в ДО ( $< 0,0003$  мг/л и  $< 0,01$  мг/кг соответственно) были зарегистрированы для 10 станций: «Карьер», «Лагерь «Дубки»», «п. Южный Урал, Лагерь «Чайка»», «Турбаза «Прогресс»», «Оренбургский район», «Красногор, Саракташский район», «Алабайтал, Беляевский район», «Никольское, Кувандыкский район», «Орск (городской пляж)», «Ириклинское водохранилище», «отд. Уральское, Кваркенский район».

Содержание ПХБ в воде и ДО и значения коэффициентов донной аккумуляции на станциях реки Урал в районе Оренбурга и на территории Оренбургской области в 2013 г.

Название станции	Концентрация ПХБ		КДА
	в воде	в донных отложениях	
	мг/л	мг/кг	
Очистные сооружения	$0,00081 \pm 0,00022$	$0,056 \pm 0,03$	69,14
Железнодорожный мост	$0,00065 \pm 0,00018$	$0,018 \pm 0,009$	27,69
Автомародожный мост	$0,00075 \pm 0,0002$	$0,016 \pm 0,008$	21,33
Водозабор	$0,00068 \pm 0,00018$	$0,035 \pm 0,02$	51,47
Карьер	$< 0,0003$	$< 0,01$	33,33
Лагерь «Дубки»	$< 0,0003$	$< 0,01$	33,33
п. Южный Урал, Лагерь «Чайка»	$< 0,0003$	$< 0,01$	33,33
п. Черноречье, мост через р. Урал	$0,00041 \pm 0,00011$	$0,017 \pm 0,009$	41,46
Турбаза «Прогресс», Оренбургский район	$< 0,0003$	$< 0,01$	33,33
с. Красногор, Саракташский район	$< 0,0003$	$< 0,01$	33,33
с. Алабайтал, Беляевский район	$< 0,0003$	$< 0,01$	33,33
с. Никольское, Кувандыкский район	$< 0,0003$	$< 0,01$	33,33
с. Хабарное ниже г. Новотроицка	$0,00035 \pm 0,00009$	$0,012 \pm 0,006$	34,29
с. Ущелье выше г. Новотроицка	$0,00031 \pm 0,00008$	$0,011 \pm 0,006$	35,48
г. Орск (городской пляж)	$< 0,0003$	$< 0,01$	33,33
п. Новоказачий выше г. Орска	$0,00031 \pm 0,00008$	$0,012 \pm 0,006$	38,71
Ириклинское водохранилище	$< 0,0003$	$< 0,01$	33,33
отд. Уральское, Кваркенский район	$< 0,0003$	$< 0,01$	33,33

Оценка содержания ПХБ в ДО, их ответственности допустимой концентрации зарубежных экологических нормативов показала превышение показателя только на двух станциях: на ст. «Очистные сооружения» в 2,8 раза и на ст. «Водозабор» в 1,75 раза. На остальных станциях показатели содержания ПХБ соответствовали допустимым нормативам.

В 2013 г. максимальная аккумулирующая способность была отмечена, как и в 2009 и 2011 годах [2] на ст. «Очистные сооружения», где значение КДА ПХБ соответствовало 69,14, что было несколько выше полученных в предыдущие годы показателей, а также высокие значения КДА были выявлены на ст. «Водозабор» – 51,47, на ст. «п. Черноречье, мост через р. Урал» – 41,46, на ст. «п. Новоказачий выше г. Орска» – 38,71.

Более низкая способность накапливать поллютанты выявлена для тех станций, где отмечено низкое содержание ПХБ в воде и ДО («Карьер», «Лагерь “Дубки”», «п. Южный Урал, Лагерь “Чайка”», «Турбаза “Прогресс”», Оренбургский район», «с. Красногор, Саракташский район», «с. Алабайтал, Беляевский район», «с. Никольское, Кувандыкский район», «г. Орск (городской пляж)», «Ириклинское водохранилище», «отд. Уральское, Кваркенский район»), коэффициент донной аккумуляции на этих станциях был равен 33,33.

Исходя из полученных данных содержания ПХБ в воде, ДО и анализа аккумулирующей способности ПХБ на разных участках реки Урал, на всех исследуемых участках уровень загрязненности токсикантом в 2013 г. можно охарактеризовать как низкий, так как не было существенного превышения ПДК для ПХБ в воде, но по принятым в практике зарубежным нормативам содержание ПХБ в ДО на отдельных станциях превышало норму в несколько раз и отличалось друг от друга по станциям: концентрация поллютантов выше на станциях, расположенных в районе Оренбурга, чем на других станциях среднего течения р. Урал от Оренбурга до Ириклинского водохранилища. Кроме того, прослежена тенденция к повышению в содержании токсикантов в период с 2009 по 2013 г. При этом отмечена достаточно активная аккумуляция ПХБ в ДО, что может вызвать риск вторичного загрязнения реки данными поллютантами, и в конечном итоге привести к неблагоприятным последствиям для жизнедеятельности биоты и нарушить устойчивость самой

экосистемы, а также быть причиной отдаленных неблагоприятных последствий для населения, проживающего на территории среднего течения р. Урал, использующего воду, загрязненную ПХБ даже в малых концентрациях, из-за высокой токсичности данных поллютантов.

Поэтому на следующем этапе исследования определяли содержание ПХБ в макрофитах доминантных и субдоминантных видов, характерных для отдельных станций реки Урал, а далее были проведены расчеты коэффициента биологического поглощения ПХБ макрофитами и коэффициенты специфического относительного накопления ПХБ макрофитами, собранными в реке Урал в районе Оренбурга и на территории Оренбургской области в 2013.

По результатам исследований установлено, что накопление ПХБ макрофитами, произрастающими в р. Урал на территории Оренбургской области, в видовом отношении достоверно различается. Так, среди всех анализируемых представителей растительного сообщества, *Lemna minor* выделяется наилучшей способностью к накоплению ПХБ, коэффициент биологического поглощения колебался от 2096,77 (ст. «п. Новоказачий, выше г. Орска») до 2933,33 (ст. «Турбаза “Прогресс”», Оренбургский район) и в среднем по станциям, где было обнаружено растение, составило 2440,14. Несколько ниже Кб был зарегистрирован для *Ceratophyllum demersum* (от 984,62 на ст. «Железнодорожный мост» до 2967,74 на ст. «с. Ущелье, выше г. Новотроицка»), в среднем по станциям – 1695,32. Высокая способность поглощать ПХБ характеризовала и *Hydrocharis morsus-ranae*, для которой Кб составил от 677,42 (ст. «п. Новоказачий, выше г. Орска») до 1225,81 (ст. «с. Ущелье, выше г. Новотроицка») или в среднем 1023,3. Все эти виды растений относятся к неукореняющимся гидрофитам и извлекают ПХБ только из водной толщи.

Среди укореняющихся макрофитов (рис. 1) наибольшая способность поглощать ПХБ характерна для *Potamogeton natans* со средним Кб 75,55 и для *Scirpus lacustris* с Кб, равным 71,31. Наименьшая способность накапливать ПХБ наблюдалась для *Nuphar lutea* со средним значением Кб 31,07 и для *Sparganium erectum* с Кб 33,52.

Ряд накопления ПХБ изучаемыми растениями по среднему значению Кб выстраивается следующим образом: *Lemna minor* > *Ceratophyllum demersum* > *Hydrocharis*

*morsus-ranae* > *Potamogeton natans* > *Scirpus lacustris* > *Potamogeton perfoliatus* > *Potamogeton crispus* > *Zannichellia palustris* > *Typha angustifolia* > *Butomus umbellatus* > *Myriophyllum spicatum* > *Potamogeton lucens* > *Sagittaria sagittifolia* > *Najas marina* > *Sparganium erectum* > *Nuphar lutea*.

Укореняющиеся макрофиты извлекают ПХБ как из донных отложений, так из воды, извлекая и накапливая поллютанты, не только растворенные в воде, но и присутствующие во взвешенно-коллоидном материале водной массы и на поверхности листьев. Замечено, что неукореняющиеся растения накапливают большие количества ПХБ, нежели укореняющиеся, что, вероятно, связано с их физиологическими и морфологическими особенностями, обеспечивающими им высокие сорбционные свойства стеблей и листьев, задерживающие и поглощающие поллютанты из воды. Исходя из сказанного доминантные виды неукореняющихся макрофитов (*Lemna minor*, *Ceratophyllum demersum*, *Hydrocharis morsus-ranae*) можно считать группой специфических концентраторов ПХБ, и она может быть рекомендована в качестве основного объекта при проведении диагностического мониторинга современного экологического состояния реки Урал. При этом удаление данной растительности из водной среды можно использовать для активации процессов самоочищения и снижения вторичного загрязнения ПХБ.

Анализ коэффициентов специфического относительного накопления ПХБ исследуемых макрофитов показал, что на ст. «Очистные сооружения» и «Чернореченский мост» большей способностью накапливать ПХБ

обладает *Sparganium erectum* (коэффициент 1,08 и 1,37 соответственно), на ст. «Железнодорожный мост» – *Scirpus lacustris* (коэффициент 1,71). На ст. «Автодорожный мост», «с. Красногор, Саракташский район», «с. Алабайтал, Беляевский район» более высокое значение было зафиксировано для *Potamogeton perfoliatus* (коэффициент 1,56; 2,91 и 2,12 соответственно).

Растение *Typha angustifolia* с коэффициентами 1,36 и 1,89 соответственно стало лидирующим по этому значению на ст. «Водозабор» и «Лагерь “Дубки”», тогда как на ст. «Карьер» – *Potamogeton crispus* (коэффициент 1,54), на ст. «Лагерь “Чайка”», «Турбаза “Прогресс”» и «п. Новоказачий, выше г. Орска», Оренбургский район» – *Potamogeton natans* (коэффициент 1,84; 1,54 и 1,77 соответственно), на ст. «с. Никольское, Кувандыкский район» – *Butomus umbellatus* (коэффициент 1,69), на ст. «с. Ущелье, выше г. Новотроицка» и «п. Новоказачий, выше г. Орска» – *Ceratophyllum demersum* (коэффициент 1,78 и 1,92 соответственно), на ст. «г. Орск (городской пляж)» – *Myriophyllum spicatum* (коэффициент 1,55) (рис. 2).

При сравнении средних значений коэффициентов специфического относительного накопления ПХБ для макрофитов, представленные на рис. 2 было показано, что более высокое значение зафиксировано для *Scirpus lacustris* (1,71), *Potamogeton perfoliatus* (1,54) и *Potamogeton natans* (1,51), которые относятся к группе укореняющихся макрофитов. Самые низкие значения наблюдались для *Nuphar lutea* (0,54) и *Hydrocharis morsus-ranae* (0,55).

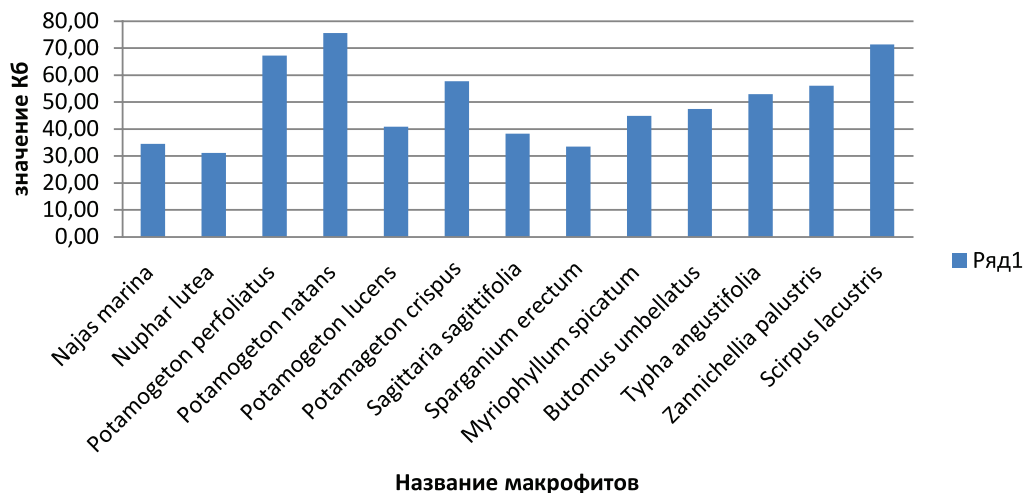


Рис. 1. Средние значения коэффициентов биологического поглощения ПХБ укореняющимися макрофитами

**Средние значения коэффициентов  
относительного специфического накопления  
ПХБ макрофитами**

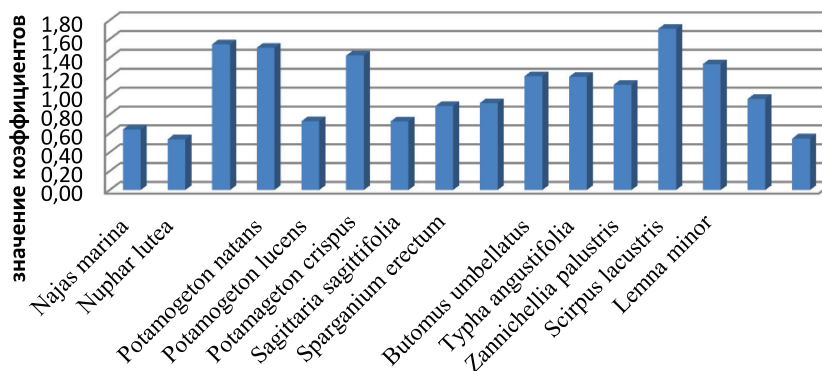


Рис. 2. Средние значения коэффициентов специфического относительного накопления ПХБ макрофитами

Ряд изучаемых макрофитов по среднему значению коэффициентов специфического накопления ПХБ выстраивается следующим образом: *Scirpus lacustris* > *Potamogeton perfoliatus* > *Potamogeton natans* > *Potamogeton crispus* > *Lemna minor* > *Butomus umbellatus* > *Typha angustifolia* > *Zannichellia palustris* > *Ceratophyllum demersum* > *Myriophyllum spicatum* > *Sparganium erectum* > *Potamogeton lucens* > *Sagittaria sagittifolia* > *Najas marina* > *Hydrocharis morsus-ranae* > *Nuphar lutea*.

Полученные данные подтверждают предположение о том, что поступление ПХБ из донных осадков и воды в растения зависит от их биологических особенностей, определяющих отличия в процессах накопления токсикантов в различных видах макрофитов при одинаковом количестве поллютантов в исследуемых водных объектах.

Полученные результаты не выявили прямой корреляционной связи между содержанием ПХБ в воде и ДО и их содержанием в макрофитах, однако установлены межвидовые различия в накоплении ПХБ в макрофитах.

Проведенные исследования грунта и фитомассы макрофитов позволили выявить процессы миграции поллютантов в разных компонентах водной среды. Установлено, что для донных отложений характерно максимальное аккумулярование ПХБ в июне, что, вероятно, связано с переходом загрязняющего вещества из воды, но снижение концентрации ПХБ

в грунтах и воде к сентябрю. Однако в это же время наблюдается увеличение коэффициента биологического поглощения токсиканта макрофитами, что свидетельствует о миграции ПХБ из донных отложений и воды в вегетативные органы растений и максимальном их концентрировании именно в осенний период (в конце периода вегетации). Следовательно, именно в этот период происходит временное выведение загрязняющего вещества из водной среды, но обратное возвращение поллютантов в воду при отмирании макрофитов, а при наличии дополнительного антропогенного загрязнения с каждым годом происходит увеличение накопления ПХБ во всех компонентах водной экосистемы (рис. 3).

Следовательно, комплексное исследование содержания ПХБ в воде, донных отложениях и фитомассе макрофитов в начале и конце вегетативного периода растений позволяет выявить перераспределение в содержании ПХБ в воде и донных отложениях и в вегетативной части растений на всех станциях реки, что подтверждает необходимость использования в процессах экологического мониторинга содержания ПХБ в водоемах не только воду и донные отложения, но и макрофиты в водных экосистемах. Изучение только воды или исследование только донных отложений может дать ложноотрицательный результат в оценке экологического состояния водной экосистемы.

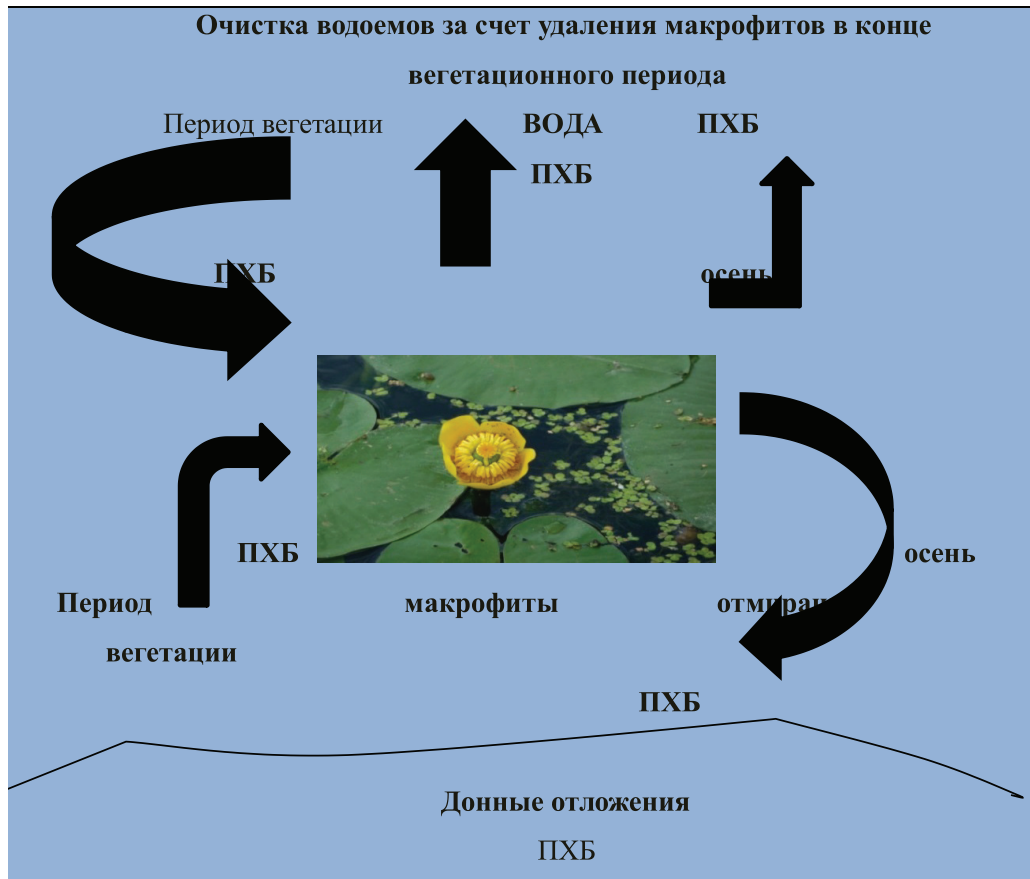


Рис. 3. Процессы миграции и вторичного перераспределения ПХБ в водной экосистеме: вода ↔ макрофиты ↔ донные отложения

Установление факта увеличения содержания токсикантов к концу периода вегетации в фитомассе макрофитов, т.е. накопления в них значительных количеств ПХБ, позволило нам сформулировать практическое предложение в плане усиления процессов биологической очистки водоемов и водотоков от высокотоксического загрязнителя: для усиления биологической очистки водоемов и водотоков рекомендуем осуществлять элиминацию фитомассы макрофитов из водных экосистем в осенний период процесса их вегетации, так как именно в этот время макрофиты максимально аккумулируют данные токсиканты и временно выводят их из водоемов и водотоков. Сохранение же их в экосистеме приводит к тому, что при отмирании макрофитов ПХБ возвращаются в экотоп водоема и аккумулируют в донных отложениях, что является дополнительным потенциальным источником загрязнения водных экосистем.

**Выводы**

1. Установлено широкое распространение ПХБ в воде и ДО р. Урал на территории Оренбургской области, содержание которых не превышало ПДК для почв и воды, но было выше зарубежных нормативов для донных отложений; максимальный показатель поллютантов зафиксирован в районе г. Оренбурга – «Автомаршрутный мост» (1,55), а минимальный на ст. «Очистные сооружения» (0,54). Выявлена активная аккумуляция ПХБ донными отложениями и четкая сезонная динамика: повышение в весенний и снижение в осенний период, а также тенденция к увеличению содержания ПХБ в период с 2009 по 2013 г.
2. «Макрофиты служат накопителями ПХБ, поступающими в водные экосистемы. Не выявлено четкой корреляционной связи между содержанием ПХБ в воде, ДО и макрофитах, но показаны межвидовые различия в накоплении ПХБ в макрофитах.

Установлены наиболее активные накопители токсикантов *Ceratophyllum demersum* (Кб-2967,74), *Lemna minor* (Кб-2933,33), *Hydrocharis morsus-ranae* (Кб-1225,81).

3. Показано, что в период вегетации происходит перераспределение поступающих в водоём полихлорбифенилов между компонентами экосистемы: снижение их содержания в воде и донных отложениях к осени, но увеличение в макрофитах, что способствует временному выведению ПХБ из экотопа, т.е. осуществляются процессы миграции ПХБ в экосистеме водоёма по цепи «вода – макрофиты – донные отложения».

4. Установление факта активного накопления ПХБ макрофитами позволило рекомендовать комплекс методов фиторе медиации в практику усиления процессов очистки грунтов, природных и сточных вод с использованием макрофитов: для усиления биологической очистки водоёмов и водотоков рекомендуем осуществлять элиминацию фитомассы макрофитов из водных экосистем в осенний период процесса их вегетации

### Список литературы

1. Беловская А. П. Высшая водная растительность // Методика изучения биогеоценозов пресных водоемов. – М.: Наука, 1975. – С. 117–132.
2. 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.
3. Губанов И.А., Киселёва К.В., Новиков В.С., Тихомиров В.Н. Иллюстрированный определитель растений Средней России. Том 1. Папоротники, хвощи, плауны, голозерные, покрытосеменные (однодольные). – М.: Т-во научных изданий КМК, Ин-т технологических исследований, 2002. – 526 с.
4. Губанов И.А., Киселёва К.В., Новиков В.С., Тихомиров В.Н. Иллюстрированный определитель растений Средней России. Т. 2: Покрытосеменные (двудольные: раздельнолепестные). – М.: Т-во научных изданий КМК, Ин-т технологических исследований, 2003. – 665 с.
5. Катанская В.М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР. – Л.: Наука, 1981. – 187 с.
6. Король В.М. Реагирование водных растений на химическое загрязнение воды: автореф. дис. ... канд. биол. Наук. – М., 1985. – 19 с.
7. Куриленко В.В., Осмоловская Н.Г., Новиков А.Н. Биогеохимическая индикация загрязнений // Водные объекты Санкт-Петербурга. – СПб.: Символ, 2002. – С. 141–147.
8. Лисицына Л.И., Папченков В.Г., Артеменко В.И. Флора водоемов волжского бассейна. Определитель сосудистых растений. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2009. – 219 с.