

На правах рукописи



ЧУКИНА НАДЕЖДА ВЛАДИМИРОВНА

**СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ
ПОКАЗАТЕЛИ ВЫСШИХ ВОДНЫХ РАСТЕНИЙ В СВЯЗИ
С ИХ УСТОЙЧИВОСТЬЮ К ЗАГРЯЗНЕНИЮ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ**

03.02.08 – экология (биология)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Борок–2010

Работа выполнена на кафедре физиологии и биохимии растений Уральского государственного университета им. А.М. Горького

Научный руководитель: доктор географических наук
Борисова Галина Григорьевна

Официальные оппоненты: доктор биологических наук, профессор
Папченков Владимир Гаврилович
кандидат биологических наук, доцент
Капитонова Ольга Анатольевна

Ведущая организация: **Учреждение Российской академии наук
Институт экологии Волжского бассейна РАН**

Защита состоится 21 декабря 2010 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета ДМ 002.036.01 при Учреждении Российской академии наук Институте биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН по адресу: 152742 Ярославская обл., Некоузский р-н, п. Борок, тел./факс (48547) 24042.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН и в сети Интернет на сайте <http://www.ibiw.ru>

Автореферат разослан 18 ноября 2010 года

Учёный секретарь диссертационного совета,
доктор биологических наук



Корнева Л.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. С каждым годом возрастает влияние антропогенной деятельности на биосферу. Водные экосистемы являются весьма чувствительным к антропогенному воздействию компонентом природной среды. Поэтому все большую актуальность приобретает изучение механизмов устойчивости гидробионтов, в том числе и макрофитов, к загрязнению водных объектов. Способность растений поглощать из водной среды биогенные вещества, а также токсичные элементы, включая тяжелые металлы (ТМ), активно обсуждается в работах многих исследователей (Кадукин и др., 1982; Золотухина и др., 1990; Микрякова, 1990, 1994, 2002; Попов, Браяловская, 2000; Третьякова, Папина, 2004; Леонова, 2004 и др.). Изучению физиолого-биохимических адаптаций водных макрофитов к неблагоприятным условиям среды посвящены исследования О.А. Капитоновой, О.А. Розенцвет, О.А. Сачковой, Г.Ф. Некрасовой и других авторов.

Работы по изучению структурно-функциональных показателей макрофитов при загрязнении водной среды, как правило, проводятся в модельных условиях на ограниченном числе видов, с использованием конкретного поллютанта, в роли которого выступает какой-либо токсичный металл или широко распространенный органический загрязнитель. Однако сведения об исследованиях, направленных на выявление механизмов устойчивости, которые формируются непосредственно в природных местообитаниях макрофитов в условиях антропогенного воздействия, весьма немногочисленны.

Изучение адаптационных возможностей растений в условиях повышенных антропогенных нагрузок на водные экосистемы представляет теоретический интерес и имеет большое практическое значение, поскольку является научной основой для биомониторинга загрязненных водных объектов, их фиторемедиации, а также повышения устойчивости гидроценозов в целом и поддержания их биологического разнообразия.

Цель и задачи исследований. Цель диссертационной работы – исследование структурно-функциональных показателей высших водных растений из местообитаний с разным уровнем антропогенного воздействия для оценки адаптационных возможностей макрофитов и выявления механизмов устойчивости к загрязнению водной среды.

Задачи исследований:

1. Выявить особенности химического состава высших водных растений (содержание в листьях минеральных веществ, органических кислот, общего азота и фосфора, растворимых белков и др.) в условиях повышенных антропогенных нагрузок на водные экосистемы.

2. Дать оценку аккумулятивной способности макрофитов из местообитаний с разным уровнем антропогенного воздействия по отношению к тяжелым металлам (медь, цинк, никель, железо, марганец).

3. Провести комплексное исследование структурно-функциональных параметров фотосинтетического аппарата растений при загрязнении водной среды.

4. Оценить параметры мезоструктуры у разных видов водных макрофитов в связи с их способностью накапливать ТМ.

5. Изучить антиоксидантный статус у исследованных видов растений с различной аккумулятивной способностью.

6. Выявить основные структурно-функциональные показатели водных растений, обуславливающие их адаптационные возможности и устойчивость к загрязнению водной среды.

Научная новизна работы

1. Впервые проведено комплексное исследование структурно-функциональных показателей водных макрофитов из природных местообитаний с различным уровнем антропогенного воздействия. При проведении исследований внимание было сконцентрировано на физиолого-биохимических механизмах адаптации, проявляющихся преимущественно на клеточном уровне, у разных видов высших водных растений.

2. Установлено, что загрязнение водной среды приводит к увеличению содержания растворимых белков и фотосинтетических пигментов, а также повышению активности каталазы в листьях изученных водных растений.

3. Впервые была проведена комплексная оценка структурно-функциональных показателей фотосинтетического аппарата макрофитов, обитающих в условиях многокомпонентного загрязнения окружающей среды, на основе которой обнаружено достоверное увеличение размеров клеток мезофилла и установлена взаимосвязь между их размерами и аккумулятивной способностью растений.

4. Впервые установлено, что виды макрофитов с максимальной способностью аккумулировать тяжелые металлы отличались повышенным содержанием в листьях низкомолекулярных антиоксидантов (аскорбат, глутатион и пролин), что предопределяет их повышенную устойчивость к условиям антропогенного загрязнения водной среды.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты диссертационной работы существенно дополняют и расширяют имеющиеся в литературе сведения об адаптационных механизмах, возникающих у растений на фоне действия различных природных и антропогенных факторов и реализуемых непосредственно в естественной среде обитания.

Изучение структурно-функциональных показателей макрофитов в условиях загрязнения водной среды представляет и практический интерес. При существенном росте антропогенных нагрузок на современные водные экосистемы весьма актуальным является выявление тех видов растений, которые обладают повышенными адаптационными возможностями. Исследования в данном направлении обеспечивают научную основу для более эффективного использования высших растений в целях биологического мониторинга и фиторемедиации загрязненных водных объектов. Материалы диссертационной работы использовались при разработке учебно-методического комплекса дисциплины «Растение и стресс», а также могут быть использованы в учебном процессе при чтении курсов лекций по экологической физиологии растений.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены на международных конференциях: «Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем», «Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон» (Санкт-Петербург, 2006), «Современная физиология растений: от молекул до экосистем» (Сыктывкар, 2007), «Физико-химические основы структурно-функциональной организации растений» (Екатеринбург, 2008), «Проблемы биоэкологии и пути их решения» (Саранск, 2008), «Физико-химические механизмы адаптации растений к антропогенному загрязнению в условиях Крайнего Севера» (Апатиты, 2009); «Гидророботаника 2010» (Борок, 2010); на ежегодном съезде «Общества экспериментальной биологии» (Чешская республика, Прага, 2010); на всероссийских научно-практических конференциях: «Экологические проблемы промышленных регионов» (Екатеринбург, 2006; 2008), «Эколого-биологические проблемы Сибири и сопредельных территорий» (Нижевартовск, 2009), «Биологические системы: устойчивость, принципы и механизмы функционирования» (Нижний Тагил, 2010); на IX Международном симпозиуме-выставке «Чистая вода России-2007» (Екатеринбург, 2007), на 7-ом Международном конгрессе «Вода: экология и технология» (Москва, 2006), на Центральном Европейском конгрессе «Eurobiotech 2010» (Польша, Краков, 2010), на 1-ом Уральском международном экологическом конгрессе «Экологическая безопасность горнопромышленных регионов» (Екатеринбург, 2007); на конференциях молодых ученых (Екатеринбург, 2006, 2007, 2008, 2010; Борок 2007).

Публикации. По материалам исследований опубликовано 26 работ, в том числе 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 3-х глав, заключения, выводов и списка использованных источников. Изложена на 135 страницах машинописного текста, содержит 12 таблиц и 13 рисунков. Библиографический список включает 237 работ, в том числе 98 иностранных.

Благодарности. Выражаю искреннюю благодарность научному руководителю Г.Г. Борисовой за огромную помощь в проведении исследований и аналитическом осмыслении материала, а также всем преподавателям и сотрудникам кафедры физиологии и биохимии растений УрГУ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обзор литературы

В данной главе представлены литературные данные об анатомо-морфологических и физиологических особенностях высших водных растений в связи с условиями обитания (Нагалецкий, Николаевский, 1981; Кокин, 1982; Лукина, Смирнова, 1988; Горышина, 1989; Некрасова и др., 2003). Проведен анализ современного состояния качества природных вод и влияния их химического состава на структурно-функциональные показатели макрофитов. Рассмотрены вопросы, связанные с изучением их аккумулятивной способ-

ности в условиях антропогенного воздействия на гидроэкосистемы (Кадукин и др., 1982; Золотухина и др., 1990; Микрякова, 1994, 2002 и др.). Выполнена оценка экологических факторов, влияющих на аккумуляцию макрофитами различных веществ (Лукина, Смирнова, 1988; Клоченко и др., 2006). Проанализированы литературные данные по изучению физиолого-биохимических адаптаций растений к загрязнению водной среды (Капитонова, 1998, 2002, 2004; Розенцвет и др., 2003, 2004; Сачкова и др., 2002, 2005; Малева и др., 2004).

2. Объекты и методы исследования

2.1. Природно-климатические условия района исследований и характеристика водных объектов

Согласно природному районированию А.Г. Чижишева (Чижишев, 1966), территория, на которой проводились исследования, относится к Средне-Зауральской области Среднего Урала. Согласно агроклиматическому районированию (Шашко, 1967), она располагается в умеренном поясе, характерной особенностью климата которого является наличие хорошо выраженных четырех сезонов года и значительная межгодовая изменчивость погодных условий.

Данная территория характеризуется высокой степенью урбанизированности. Для решения поставленных задач были выбраны водоемы и водотоки Свердловской области, различающиеся степенью антропогенной нагрузки (рис.1). Все водотоки – типично уральские реки с четко выраженным весенним половодьем, летне-осенними дождевыми паводками и длительной устойчивой зимней меженью. В питании рек преимущественное значение имеют талые снеговые воды, доля которых составляет 65-75 %. Подземным путем формируется около 25-35 % годового стока.

Исследованные водные объекты характеризуются повышенным фоновым содержанием тяжелых металлов, что обусловлено распространением полиметаллических руд в пределах их бассейнов. Однако многие водные объекты испытывают на себе воздействие предприятий горнодобывающей промышленности, в результате чего концентрации металлов значительно превышают как фоновые значения, так и ПДК для водных объектов рыбохозяйственного назначения. Однако стоит отметить, что со сточными водами предприятий, а также диффузным путем в данные водные объекты поступают и другие загрязнители, такие как азот аммонийный и нитратный, фенольные соединения, нефтепродукты и т.п.



/ - места отбора растительного материала и проб воды

Рис. 1. Картограмма района проведения исследований

2.2. Характеристика исследованных макрофитов

В качестве объектов исследований были использованы: элодея канадская (*Elodea canadensis* Michx.), рдест пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus* L.), рдест курчавый (*Potamogeton crispus* L.), рдест гребенчатый (*Potamogeton pectinatus* L.), рдест альпийский (*Potamogeton alpinus* Balb.), шелковник волосистый (*Batrachium trichophyllum* Bosch (Chaix.)), ряска горбатая (*Lemna gibba* L.), роголистник погруженный (*Ceratophyllum demersum* L.), стрелолист обыкновенный (*Sagittaria sagittifolia* L.) и др. Все указанные макрофиты относятся к группе гидрофитов, или настоящих водных растений, за исключением стрелолиста обыкновенного. Тем не менее, стрелолист был одним из объектов изучения, т.к. в исследованных водотоках и водоемах он представлен преимущественно заходящими в воду формами. Для анализа показателей в данном случае отбирали только погруженные листья.

2.3. Содержание и методы исследований

В качестве основного методического приема при выполнении данной работы было сопоставление отдельных анатомических и физиолого-биохимических показателей у разных видов высших водных растений, произрастающих в водных объектах Свердловской области с разной степенью антропогенной нагрузки.

Отбор растительного материала для проведения исследований осуществляли в июле-августе 2005-2008 гг. в период цветения макрофитов.

Одновременно с отбором растительного материала проводили отбор проб воды, путем смешивания разных образцов до глубины 0.5 м.

Для определения физиологических и биохимических показателей использовали завершившие рост листья макрофитов (фронды у ряски). Усредненную пробу листьев каждого вида отбирали не менее чем с 10 растений. Количество фрондов ряски определялось задачами исследования.

Для решения поставленных задач были использованы следующие методы:

Содержание металлов в листьях макрофитов и поверхностных водах определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии после мокрого озоления 70% азотной кислотой (Ермаченко, Ермаченко, 1999).

Содержание аммонийного азота и нитратов в пробах воды определяли по общепринятым методикам (Унифицированные методы..., 1971).

Зольность и количество минеральных веществ определяли после сжигания навески растительного материала в муфельной печи в течение 8 часов при 550° С.

Содержание общего азота и фосфора измеряли колориметрически после мокрого озоления растительного материала смесью кислот: H₂SO₄ и HClO₄ в колбах Кьельдаля. Определение общего азота проводили с помощью реактива Несслера, а фосфора – с молибдатом аммония в кислой среде.

Определение суммы растворимых сахаров и крахмала проводили антроновым методом на холоде, путем экстрагирования 80 % этанолом (Fales, 1951). Жидкую фракцию использовали для определения суммы растворимых сахаров, которое вели на спектрофотометре при 625 нм. Осадок использовали для определения крахмала после гидролиза. Гидролиз проводили 3 % HCl при температуре 125° С (3 часа).

Содержание растворимого белка в растительном материале определяли по Шактерле (Shakterle, Pollack, 1973).

Количество тиоловых групп определяли по методу Элмана с использованием 5,5–дитиобис (2-нитробензойной) кислоты (ДТНБК) (Ellman, 1959).

Анализ показателей мезоструктуры листьев макрофитов (и фрондов ряски) проводили на растительном материале, фиксированном в 3.5 % растворе глутарового альдегида в фосфатном буфере (pH 7.2) согласно методике, разработанной в УрГУ (Мокроносов, Борзенкова, 1978).

Содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов определяли спектрофотометрически. Расчет хлорофиллов проводили по формуле Vernon, содержание каротиноидов рассчитывали по Wettstein (Гавриленко, Хандобина, 1975). Для экстрагирования пигментов из листьев использовали 80 % водный раствор ацетона.

Интенсивность процессов перекисного окисления липидов (ПОЛ) и активность антиоксидантных ферментов определяли в усредненных пробах листьев, которые гомогенизировали на холоде в 0.1 М К/Na-фосфатном буфере (pH=7.4). Гомогенат использовали для определения ПОЛ, активности супероксиддисмутазы (СОД) и пероксидазы.

Определение интенсивности ПОЛ проводили в бутанольном экстракте, по содержанию ТБК-реагирующих продуктов (Uchiyama, Mihara, 1978).

Активность супероксиддисмутазы (СОД) определяли методом, основанном на измерении ингибирования фотохимического восстановления нитросинего тетразолия (Beauchamp, Fridovich, 1971).

Активность гваякол-специфичной пероксидазы оценивали по увеличению оптической плотности реакционной среды при 470 нм в результате окисления гваякола (Chance, Maehly, 1955).

Активность каталазы и полифенолоксидазы определяли титрометрическим методом (Починок, 1975).

Содержание пролина определяли по общепринятой методике (Bates, 1978) с использованием ациднингидринового реактива.

Определение аскорбиновой кислоты и глутатиона проводили из одной усредненной навески листьев трилонометрическим методом, путем параллельного титрования 2,6-дихлорфенолиндифенолом и йодатом калия (Чупахина, 2000).

Содержание флавоноидов определяли в спиртовой (96 % этанол) вытяжке с использованием лимоннокислого борного реактива на спектрофотометре при длине волны 420 нм (Рогожин, 2006).

Статистическая обработка данных. Определение физиологических и биохимических показателей проводили в 3-х аналитических повторностях. Для статистической обработки результатов использовали программы Excel 7.0 и Statistica 6.0. Для оценки достоверности различий использовали непараметрический критерий Манна-Уитни при уровне значимости $p < 0.05$. Корреляционный анализ проводили с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Для анализа выделенных групп видов макрофитов согласно их аккумулятивной функции был использован дискриминантный анализ. Средние арифметические значения показателей и их стандартные ошибки представлены в таблицах и рисунках.

3. Результаты исследований и их обсуждение

3.1. Химический состав изученных видов макрофитов при различных уровнях антропогенного воздействия

Как известно, существует тесная связь между концентрацией химических элементов в воде и их содержанием в листьях водных растений. Избыток поллютантов органической и неорганической природы в среде обитания, как правило, приводит к повышенному их накоплению растительными организмами.

Проведенный анализ концентраций ТМ в выбранных водных объектах показал, что содержание металлов различалось в несколько раз. За «условно чистые» принимали оз. Икбулат, рр. Сысерт, Северушка, Решетка, т. к. они подвергаются наименьшей антропо-

генной нагрузке. Среднее содержание тяжелых металлов в поверхностных водах исследованных водных объектов приведено в табл. 1.

Таблица 1. Содержание тяжелых металлов в поверхностных водах исследованных водных объектов

Водные объекты	Концентрация металлов в воде, мкг/л				
	Cu	Ni	Zn	Mn	Fe
р. Северушка	8.9	3.8	5.8	21.3	60.5
оз. Икбулат	6.7	6.5	21.9	79.2	143.8
р. Сысерть	4.8	3.3	9.9	39.2	340.3
р. Чусовая	24.3	7.1	13.7	69.0	620.2
р. Решетка	7.6	11.9	10.5	15.9	162.5
р. Исеть	8.2	4.4	40.1	64.6	212.3
р. Ревда	11.3	988.1	9.3	21.6	163.1
р. Пышма	42.2	146.4	19.4	240.5	220.2
Отстойник трубного завода	34.4	588.2	42.1	539.3	582.8
ПДК (для рыбохозяйственных водоемов)	1.0	10.0	10.0	10.0	100.0

Наши исследования показали, что содержание отдельных металлов в листьях макрофитов одного и того же вида может различаться в десятки раз, в зависимости от концентрации данного металла в водной среде. Так, например, полученные нами данные по элодее (*Elodea canadensis*) показали, что содержание меди в листьях растений из более загрязненных местообитаний возрастало в 28, цинка – в 3, железа – в 2.8 раза по сравнению с растениями из «условно чистых» водных объектов.

При сопоставлении интенсивности накопления ТМ в растениях изученных видов установлено, что максимальной аккумулятивной способностью по отношению к меди, цинку, железу и марганцу отличался *Batrachium trichophyllum*, а по отношению к никелю – *Ceratophyllum demersum*. Высокой поглотительной способностью характеризовалась также *Lemna gibba*. Наименьшее накопление тяжелых металлов было зафиксировано в листьях *Potamogeton alpinus* и *Sagittaria sagittifolia* (табл. 2).

Повышенное накопление ТМ в листьях исследованных водных растений при загрязнении водной среды сопровождалось изменением ряда показателей химического состава. У большинства изученных нами видов из более загрязненных местообитаний было зафиксировано повышенное содержание в листьях зольных элементов. В среднем это увеличение составляло 30 %, а в отдельных случаях отмечено двукратное повышение данного показателя. Это объясняется характерной для водных растений более высокой аккумуляцией веществ при увеличении их концентрации в воде.

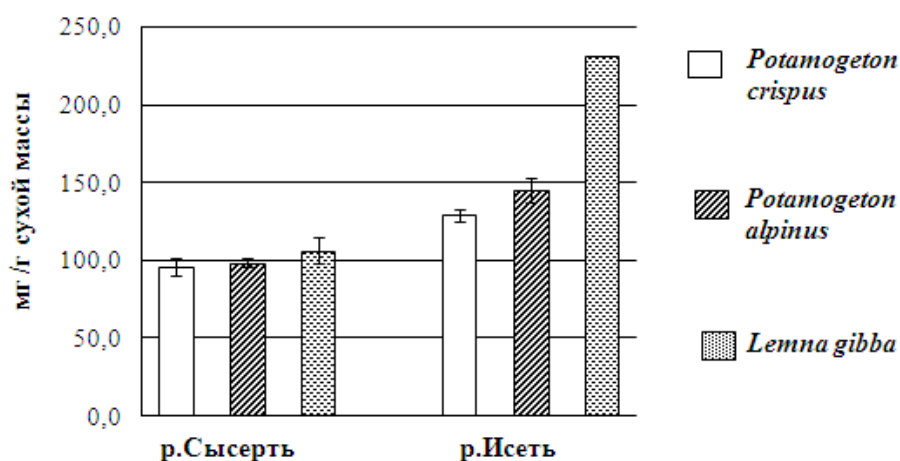
Установлено, что при возрастании уровня загрязненности водной среды в листьях исследованных макрофитов достоверно повышалось содержание биогенных элементов (общего азота и фосфора) по сравнению с растениями из «условно чистых» водотоков и водоемов (в среднем на 25 % и 60 % соответственно).

Таблица 2. Средние значения коэффициентов биологического накопления металлов у исследованных макрофитов

Вид растения	Коэффициенты биологического накопления				
	Ni	Cu	Fe	Zn	Mn
<i>Sagittaria sagittifolia</i>	651	1226	1368	4343	19576
<i>Potamogeton alpinus</i>	2909	1694	1178	4674	24464
<i>Potamogeton perfoliatus</i>	1993	2799	5404	13858	38585
<i>Potamogeton friesii</i>	2185	3487	7149	9081	18238
<i>Potamogeton pectinatus</i>	2759	2056	11425	4554	15433
<i>Elodea canadensis</i>	1897	3812	7690	22755	47812
<i>Lemna gibba</i>	1764	4513	17768	20624	26264
<i>Potamogeton crispus</i>	4233	4591	2079	24426	18672
<i>Ceratophyllum demersum</i>	4592	4901	9605	20398	95804
<i>Batrachium trichophyllum</i>	554	7762	50170	32620	179460

Примечание. В таблице указаны значения, полученные путем усреднения коэффициентов биологического накопления у растений одного вида из разных местообитаний.

Отмечено также, что у всех изученных видов в пробах растений из более загрязненных водотоков (р. Исеть) достоверно увеличивалось содержание растворимых белков (на 35-40 %), для *Lemna gibba* отмечено двукратное повышение (рис. 2).



все различия с «условно чистым» водным объектом (р. Сысерть) достоверны при $p < 0.05$

Рис. 2. Содержание растворимых белков в макрофитах из водных объектов, различающихся уровнем антропогенной нагрузки

Очевидно, это связано с образованием различных металлсвязывающих соединений (металлотионеины и фитохелатины), синтез которых индуцируется при попадании металлов в клетку, и которые связывают ионы ТМ, тем самым уменьшая их токсичность.

Анализ содержания тиоловых групп (-SH) в белковой фракции биомассы листьев *Potamogeton perfoliatus* из местообитаний с различной антропогенной нагрузкой показал, что при повышенных концентрациях тяжелых металлов в водной среде количество соединений, содержащих тиоловые группы, увеличивалось.

Так, например, в листьях рдеста пронзеннолистного из местообитания с высокой степенью загрязнения (р. Ревда) содержание SH-групп в белковой фракции в пять раз превышало соответствующий показатель у растений из «условно чистого» водного объекта (р. Сысерть) (3.3 ± 0.07 и 0.65 ± 0.03 мМ/мг белка соответственно). Следовательно, эту ответную реакцию можно также рассматривать как проявление одной из физиолого-биохимических адаптаций макрофитов к загрязнению среды обитания.

Известно, что в ответные реакции на некоторые виды стресса могут быть вовлечены растворимые сахара, особенно сахароза, глюкоза и фруктоза (Souee et al., 2006). Поэтому данные о количестве и составе углеводов в листьях растений из различных местообитаний представляют определенный интерес.

Анализ содержания углеводов в листьях изученных макрофитов обнаружил отрицательную корреляцию между содержанием крахмала и растворимых сахаров ($r = -0.74$, $p < 0.05$). В результате исследований не было получено достоверных различий между накоплением сахаров в листьях растений из местообитаний с различной степенью загрязненности, хотя известно, что при начинающемся стрессе наблюдается активация катаболизма (Тарчевский, 1993). Очевидно, этот факт объясняется тем, что повышенный уровень загрязнения водных объектов формировался постепенно, у растений выработались защитные механизмы, и в данном случае повышенные концентрации поллютантов в водной среде не являются экстремальными для макрофитов.

Таким образом, изменение химического состава макрофитов (повышенное содержание минеральных веществ, в том числе ТМ, биогенных элементов, растворимых белков) в условиях загрязнения среды обитания можно расценивать как проявление ответных реакций растений на химическое загрязнение воды.

3.2. Характеристика структурно-функциональных показателей фотосинтетического аппарата макрофитов при загрязнении среды обитания

Важную роль в обеспечении устойчивости растений к стрессорам различной природы играет структурно-функциональная организация фотосинтетического аппарата. Изменение параметров мезоструктуры листа рассматривается как существенное проявление регуляции фотосинтеза на морфогенетическом уровне, обеспечивающее оптимизацию и адаптацию фотосинтетического аппарата в различных экологических условиях.

Анализ показателей мезоструктуры листа исследованной группы макрофитов показал, что такие виды как *Lemna gibba* и *Ceratophyllum demersum* отличались наибольшей толщиной листовой пластинки. Наибольшие размеры клеток мезофилла отмечены у этих же видов макрофитов (табл. 3).

Таблица 3. Параметры мезоструктуры фотосинтетического аппарата макрофитов

Вид	Толщина листа, мкм	Площадь поверхности клетки, тыс. мкм ²	Объем клетки, тыс.мкм ³	Площадь поверхности хлоропласта, мкм ²	Объем хлоропласта мкм ³
	среднее значение ± ошибка среднего				
<i>Elodea canadensis</i>	64.7 ± 20.16	4.7 ± 1.1	24.6 ± 7.0	95.4 ± 4.4	89.1 ± 6.3
<i>Potamogeton alpinus</i>	64.7 ± 0.00	2.1 ± 0.1	8.3 ± 0.8	81.7 ± 4.3	70.9 ± 5.7
<i>Potamogeton perfoliatus</i>	48.5 ± 1.5	2.1 ± 0.5	7.6 ± 2.8	72.3 ± 4.7	58.8 ± 5.5
<i>Potamogeton crispus</i>	91.9 ± 5.6	3.7 ± 0.3	18.1 ± 1.2	75.2 ± 10.0	65.4 ± 11.3
<i>Batrachium trichophyllum</i>	250.4 ± 8.7	3.4 ± 0.4	15.2 ± 2.5	85.5 ± 0.5	75.6 ± 0.6
<i>Ceratophyllum demersum</i>	371.4 ± 16.7	26.0 ± 3.9	255 ± 82.2	67.7 ± 4.1	54.4 ± 6.1
<i>Lemna gibba</i>	1862.5 ± 137.5	6.1 ± 1.5	36.9 ± 11.8	99.0 ± 6.0	95.8 ± 23.6

По-видимому, данные черты строения фотосинтетического аппарата и обеспечивают этим видам высокую аккумулятивную способность в условиях загрязнения среды обитания различными поллютантами. Сравнительный анализ параметров мезоструктуры фотосинтетического аппарата изученных макрофитов показал, что листья растений из более загрязненных местообитаний (например, р. Исеть) достоверно отличались большими размерами клеток мезофилла (табл. 4).

Таблица 4. Параметры клеток мезофилла макрофитов из водных объектов с различной величиной антропогенной нагрузки

Вид	Водоток	Площадь проекции клетки, тыс. мкм ²	Объем клетки, тыс. мкм ³	Площадь поверхности клетки, тыс. мкм ²
	среднее значение ± ошибка среднего			
<i>Lemna gibba</i>	р. Сысерть	1147.8 ± 269.6	25.1 ± 2.3	4.6 ± 0.3
	р. Исеть	1879.7 ± 128.6*	48.6 ± 4.8*	7.5 ± 0.54*
<i>Potamogeton crispus</i>	р. Сысерть	843.1 ± 39.2	16.9 ± 1.2	3.4 ± 0.1
	р. Исеть	993.3 ± 75.8	19.3 ± 2.3	3.9 ± 0.4
<i>Potamogeton alpinus</i>	р. Сысерть	480.0 ± 24.4	7.4 ± 0.6	1.9 ± 0.0
	р. Исеть	574.0 ± 28.6*	9.1 ± 0.7*	2.3 ± 0.1*
<i>Ceratophyllum demersum</i>	р. Сысерть	5501.4 ± 350.1	249.0 ± 28.4	22.0 ± 1.4
	р. Исеть	7485.1 ± 541.6*	458.5 ± 47.2*	29.9 ± 2.1*

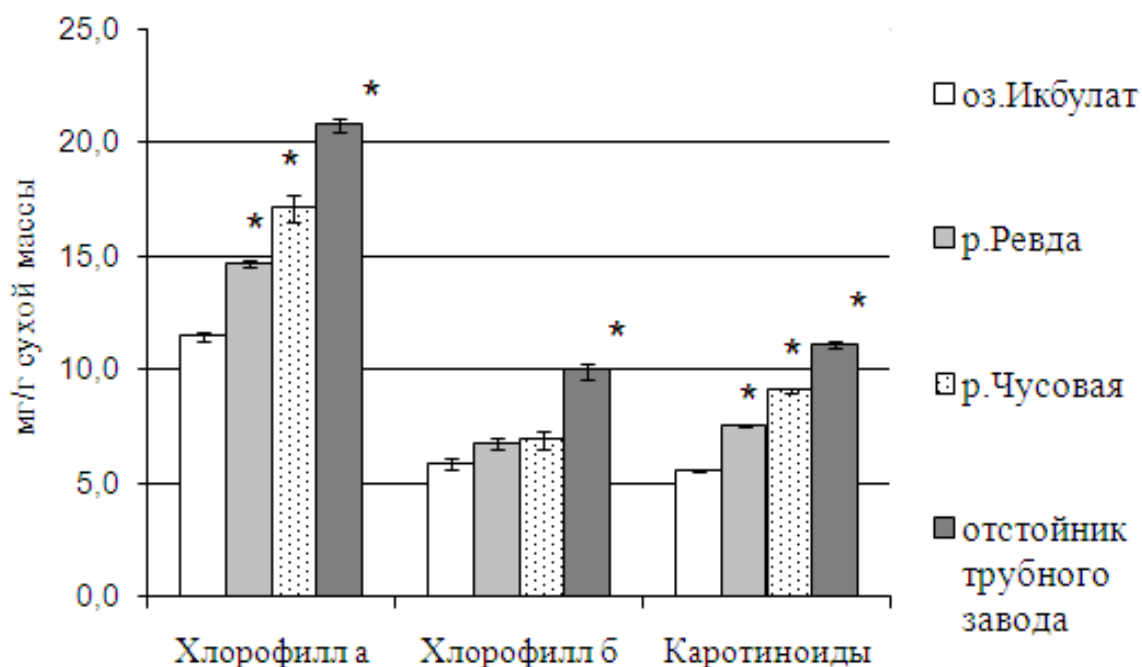
*-достоверность отличий от «условно чистого» местообитания (р.Сысерть) при $p < 0.05$

В среднем, объем и площадь поверхности клеток мезофилла были выше в 1.5 раза (при более значительной антропогенной нагрузке на водоток). Вероятно, это связано с

повышенным накоплением ТМ и других веществ в листьях изученных видов макрофитов, отмеченным нами при загрязнении водной среды. Анализ полученных данных по количеству клеток и хлоропластов на единицу поверхности листа, а также по числу хлоропластов в клетке и их размерам не выявил каких-либо сходных тенденций.

Обнаружено также, что при повышении уровня загрязнения среды в листьях исследованных водных растений возрастало количество фотосинтетических пигментов. В среднем для изученной группы видов содержание хлорофиллов «а» и «б» увеличивалось в 1.5, а содержание каротиноидов – в 1.8 раза.

Например, в листьях *Elodea canadensis* из водоема с относительно невысокой антропогенной нагрузкой (оз. Икбулат) содержание фотосинтетических пигментов было существенно ниже по сравнению с растениями этого же вида из водных объектов, отличающихся более высокой степенью воздействия (рис. 3).



*-достоверность отличий от «условно чистого» местообитания (оз. Икбулат) при $p < 0.05$

Рис. 3. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях *Elodea canadensis* Michx., из местообитаний, различающихся уровнем антропогенной нагрузки

Таким образом, проведенный анализ параметров мезоструктуры фотосинтетического аппарата исследованной группы макрофитов показал, что растения из местообитаний с повышенной антропогенной нагрузкой отличались большими размерами клеток мезофилла листа и повышенным содержанием в листьях фотосинтетических пигментов. Данные изменения можно рассматривать как защитно-приспособительную реакцию, которая по сравнению с другими адаптациями отличается достаточно медленными темпами.

3.3. Антиоксидантный статус у исследованных видов растений при разных уровнях антропогенного воздействия

Повышенное образование активных форм кислорода в клетке под действием различных неблагоприятных факторов среды вызывает окислительный стресс. Одной из возможных ответных реакций на стрессовое воздействие является активация процессов перекисного окисления липидов (ПОЛ).

В результате исследования процессов пероксидации липидов установлено, что максимальная интенсивность ПОЛ наблюдалась в листьях *Batrachium trichophyllum* (1.30 мМ/г сухой массы), а в листьях *Potamogeton alpinus* она была минимальна и составляла не более 0.09 мМ/г сухой массы. В целом для большинства изученных видов макрофитов содержание ТБК-реагирующих продуктов в листьях не превышало 0.25 мМ/г сухой массы. Лишь у 10 % видов интенсивность процессов ПОЛ была выше 0.3 мМ/г сухой массы, причем, в основном это виды, обитающие в водных объектах с высоким уровнем техногенной нагрузки (р. Ревда, р. Пышма).

Живые организмы, в том числе и растительные, обладают достаточной устойчивостью к окислительным повреждениям, которая во многом обусловлена функционированием антиоксидантной системы, представленной ферментным комплексом, включающим: СОД, каталазу, пероксидазу и другими ферментами, а также низкомолекулярными компонентами.

Как показали результаты наших исследований, минимальными значениями активности СОД отличались листья *Sagittaria sagittifolia*, содержание ТМ в которых было существенно ниже, чем у остальных изученных видов макрофитов. Напротив, в листьях *Batrachium trichophyllum*, для которых характерна высокая аккумулятивная способность, этот показатель был максимальным (рис. 4).

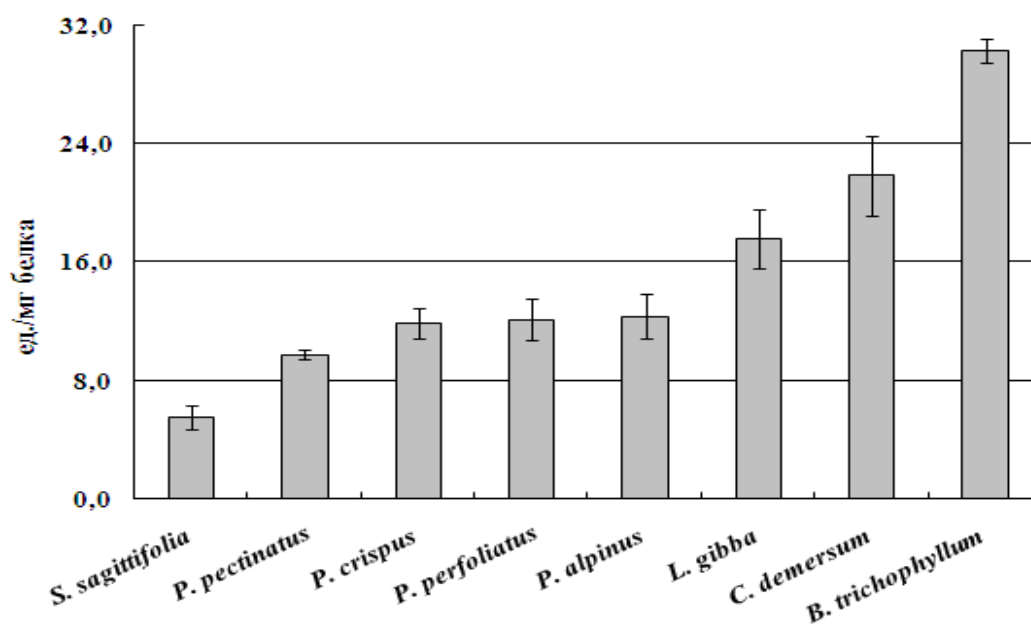
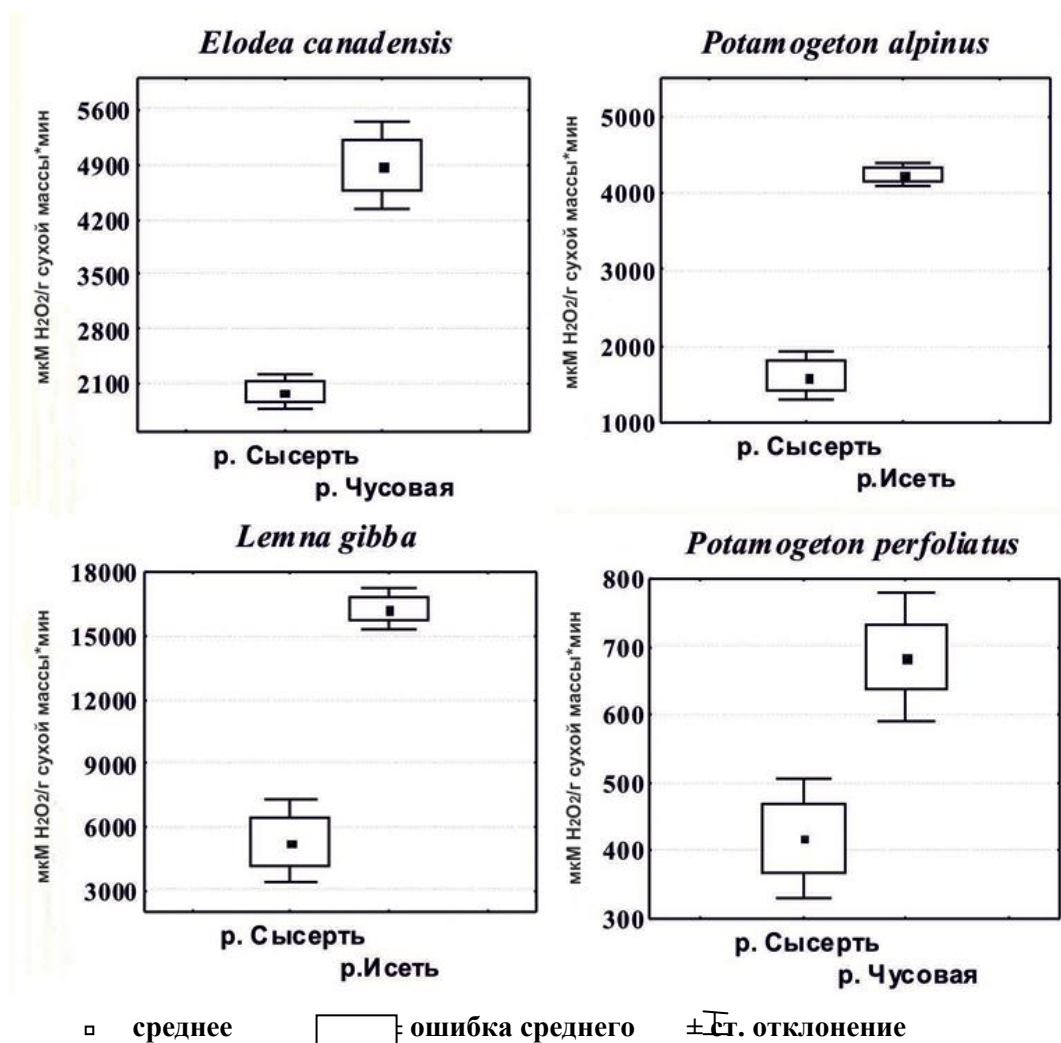


Рис. 4. Средние значения активности СОД в разных видах макрофитов. На рисунке представлены значения, усредненные для растений одного вида из разных местообитаний, и их стандартные ошибки

Отмечены также высокие значения активности СОД у *Lemna gibba* и *Ceratophyllum demersum*, характеризующихся повышенной накопительной способностью. Для всех изученных видов рдестов значения активности СОД изменялись незначительно (коэффициент вариации составлял не более 10 %).

Изучение каталазы в листьях макрофитов, из водотоков с различной степенью загрязнения, показало, что активность этого фермента существенно варьировала у разных видов. В результате исследований были обнаружены статистически достоверные различия по активности каталазы между растениями одного вида, обитающими в водотоках с разным уровнем воздействия (рис. 5).



все различия с «условно чистым» водным объектом (р. Сысерть) достоверны при $p < 0.05$.

Рис. 5. Активность каталазы в макрофитах из водных объектов с различным уровнем антропогенной нагрузки

Установлено, что по данному показателю растения из водотоков с высоким (р. Исеть, р. Чусовая) и низким (р. Сысерть) уровнем загрязнения различались более чем в 2.5–5 раз, что указывает на способность стрессоров химической природы индуцировать формирование этого защитного механизма.

Изучение гваякол-пероксидазы и полифенолоксидазы в исследованных видах растений не выявило однозначной зависимости активности этих ферментов от уровня загрязненности водной среды. Однако у изученных водных растений была обнаружена взаимосвязь между наблюдаемой активностью пероксидазы и полифенолоксидазы. Для *Lemna gibba*, например, отмечены очень низкие показатели активности как пероксидазы, так и полифенолоксидазы (114.2 мкМ/г сухой массы*мин и 177.3 мМ/г сухой массы*мин соответственно). Напротив, максимальные активности этих ферментов наблюдались в листьях *Potamogeton crispus* (1212.9 мкМ/г сухой массы*мин и 861.9 мМ/г сухой массы*мин соответственно).

Сопоставление содержания в растениях низкомолекулярных антиоксидантов (аскорбат, глутатион, пролин, флавоноиды) не выявило однозначной зависимости между их количеством и уровнем загрязненности водной среды. Вместе с тем, оказалось, что максимальными значениями по всем этим показателям отличались те виды макрофитов, для которых характерна и максимальная аккумулятивная способность по отношению к ТМ. Из изученных растений наибольшее содержание аскорбиновой кислоты было характерно для *Lemna gibba* и *Ceratophyllum demersum* (рис. 6).

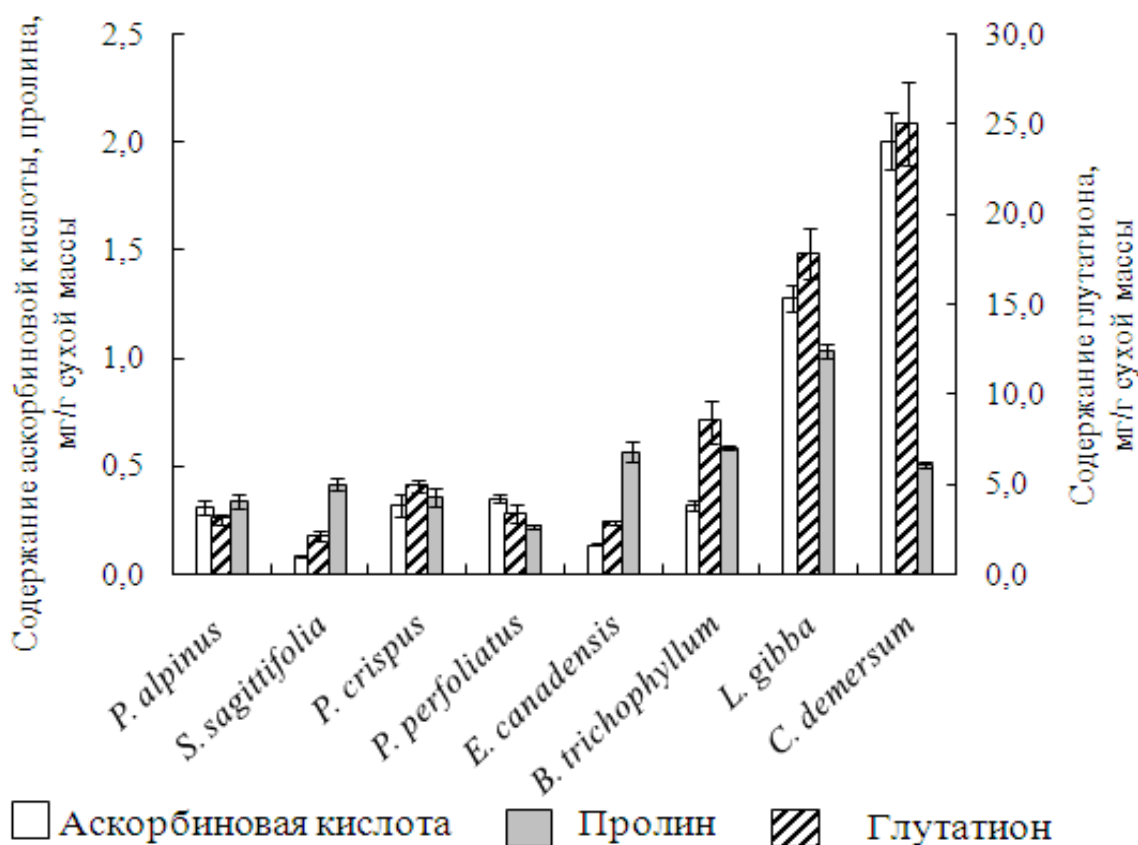


Рис. 6. Среднее содержание низкомолекулярных антиоксидантов у разных видов макрофитов. На рисунке представлены значения, усредненные для растений одного вида из разных местообитаний, и их стандартные ошибки

У *Ceratophyllum demersum*, например, наблюдалось шестикратное, а у *Lemna gibba* – отмечено четырехкратное превышение этого показателя, по сравнению со средним значением у исследованной группы видов. В листьях *Ceratophyllum demersum* было зафиксировано также максимальное количество глутатиона. Наибольшим накоплением пролина отличалась *Lemna gibba*. В листьях *Elodea canadensis*, *Batrachium trichophyllum* и *Ceratophyllum demersum* также обнаружено повышенное его количество.

Анализ содержания флавоноидов в листьях макрофитов показал отсутствие зависимости накопления этих вторичных метаболитов в растениях от степени загрязнения водной среды. Для данной группы растений этот показатель в среднем составил 91.0 мг/г сухой массы. Отмечено, что максимальными и минимальными значениями этого параметра отличались виды с противоположными «стратегиями накопления». Наибольшее содержание в листьях флавоноидов было характерно для *Ceratophyllum demersum*. В листьях *Batrachium trichophyllum* также обнаружено повышенное их количество (по сравнению со средними у разных видов значениями). В листьях *Potamogeton alpinus*, характеризующегося низкой накопительной способностью, напротив, содержание флавоноидов было минимальным (31.5 мг/г сухой массы).

Анализ коэффициентов биологического накопления ТМ, представленный в вышеизложенной главе, показал, что изученные макрофиты представляют собой неоднородную группу объектов. Для анализа выделенных трех групп видов водных растений (аккумуляторы, отражатели и промежуточные) был использован дискриминантный анализ. На рис. 7 представлено распределение видов макрофитов в пространстве дискриминантных функций.

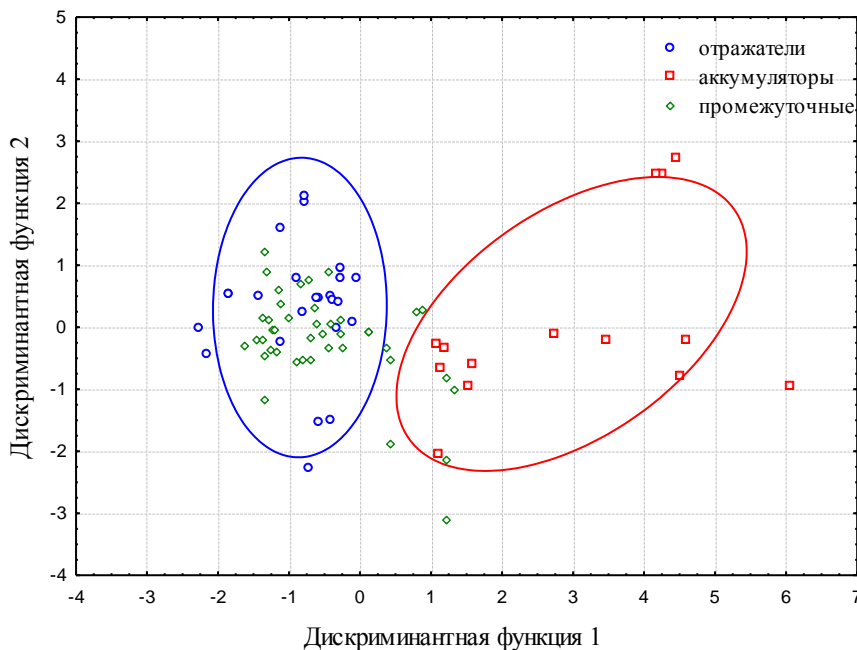


Рис. 7. Дискриминантный анализ видов макрофитов с разной накопительной способностью по отношению к ТМ по основным показателям антиоксидантной системы

Группа видов-аккумуляторов (*Batrachium trichophyllum*, *Lemna gibba* и *Ceratophyllum demersum*) достоверно выделялась по первой функции, которая обнаружила достоверные корреляции с содержанием в листьях низкомолекулярных антиоксидантов: аскорбата, глутатиона и пролина (рис. 7).

Таким образом, результаты дискриминантного анализа двух групп макрофитов, противоположных по «аккумулятивной стратегии», показали, что виды-накопители в противоположность видам-отражателям характеризовались высоким содержанием низкомолекулярных антиоксидантов, что является подтверждением их повышенной устойчивости к стрессорам химической природы.

На рис. 8а представлены параметры антиоксидантной системы двух видов макрофитов из местообитаний с высокой антропогенной нагрузкой (р. Ревда). Показано, что содержание низкомолекулярных антиоксидантов в листьях *Batrachium trichophyllum*, отличающегося максимальной накопительной способностью по отношению к 4-м из пяти исследованных нами металлов, превышало в 2-4.5 раза соответствующие показатели в листьях *Potamogeton alpinus*, в листьях которого обнаружено наименьшее содержание металлов. В листьях *Batrachium trichophyllum* отмечено также превышение активности ферментов-антиоксидантов (пероксидазы и СОД) в 2.5 и 3.3 раза соответственно.

Проведенное сопоставление параметров антиоксидантной защиты в листьях *Potamogeton alpinus* (отражателя) и другого вида накопителя – *Ceratophyllum demersum*, обитающих в р. Исеть, обнаружило сходные закономерности (рис. 8б).

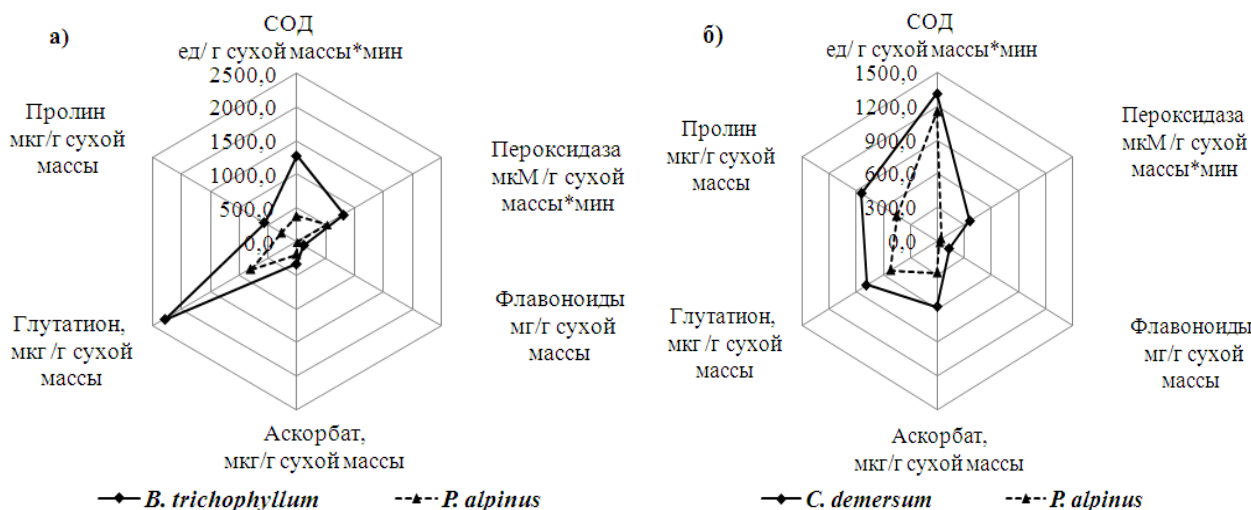


Рис. 8. Параметры антиоксидантной системы макрофитов с высокой (*Batrachium trichophyllum*, *Ceratophyllum demersum*) и низкой (*Potamogeton alpinus*) накопительной способностью из водотоков: а) р. Ревда, б) р. Исеть

Таким образом, данные примеры наглядно показывают, что виды, обладающие высокой накопительной способностью, характеризуются более высоким содержанием низкомолекулярных антиоксидантов независимо от величины антропогенной нагрузки на водоток, по сравнению с видами-отражателями. Это может свидетельствовать о высоких

адаптивных возможностях видов–накопителей, существующих в условиях повышенных концентраций поллютантов в водной среде, поскольку устойчивость растительного организма во многом определяется функционированием систем детоксикации. Тем не менее, многие виды макрофитов, которые относятся к отражателям, а также растения с промежуточной «аккумулятивной стратегией», несмотря на невысокое содержание антиоксидантов, способны произрастать в местообитаниях с высокой степенью загрязнения водной среды. Очевидно, для них большую роль в адаптации к условиям среды играют защитные механизмы, предотвращающие проникновение поллютантов внутрь и, по видимому, существенную роль в этом играет барьерная функция корневой системы.

Заключение

Проведенные исследования структурно-функциональных показателей макрофитов в условиях загрязнения водной среды показали, что адаптивные возможности растений определяются как их видовой спецификой, так и соответствующими условиями среды.

Исследования показали, что в условиях повышенных антропогенных нагрузок на водную среду у большинства изученных видов наблюдались изменения структурно-функциональных показателей растений. Одни из них непосредственно направлены на повышение устойчивости организмов, другие, хотя и являются отражением химического состава среды, также способствуют повышению адаптивных возможностей растительного организма к стрессорам химической природы.

Выявлено, что для видов, обладающих повышенной аккумулятивной способностью, характерен высокий антиоксидантный статус. Напротив, для видов с невысокой способностью к аккумуляции большую роль в адаптации к условиям среды играют защитные механизмы, предотвращающие проникновение поллютантов.

Выводы

1. Показано, что в листьях большинства исследованных водных растений при повышении степени загрязнения среды обитания наблюдалось увеличение содержания зольных элементов, а также общего азота и фосфора. Очевидно, этот факт обусловлен их повышенной концентрацией в водной среде, что, в свою очередь, связано с поступлением в водные объекты сельскохозяйственных, промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод.

2. Установлено, что накопление металлов в листьях макрофитов из водных объектов, подвергающихся значительному антропогенному воздействию, существенно повышалось по сравнению с растениями из менее загрязненных водоемов и водотоков. Наиболее высокой накопительной способностью по отношению к тяжелым металлам отличались *Batrachium trichophyllum*, *Ceratophyllum demersum* и *Lemna gibba*. Наименьшее содержание тяжелых металлов было зафиксировано у *Potamogeton alpinus* и *Sagittaria sagittifolia*.

3. Выявлено, что растения из местообитаний с повышенной антропогенной нагрузкой отличались большими размерами клеток мезофилла листа и повышенным содержанием в листьях фотосинтетических пигментов (хлорофиллов, каротиноидов). Данные изменения можно рассматривать как защитно-приспособительную реакцию, которая по сравнению с другими адаптациями отличается достаточно медленными темпами.

4. Установлено, что виды растений, характеризующиеся максимальной аккумулятивной способностью, отличались более толстой листовой пластинкой и более крупными размерами клеток мезофилла. По-видимому, данные особенности строения фотосинтетического аппарата и обеспечивают их высокую аккумулятивную способность в условиях загрязнения среды различными поллютантами.

5. Установлено, что виды, обладающие высокой накопительной способностью, отличались высоким антиоксидантным статусом, что выражалось в повышенной активности фермента супероксиддисмутазы и высоком содержании в листьях низкомолекулярных антиоксидантов. Данный факт является подтверждением повышенной устойчивости видов-накопителей к стрессорам химической природы, что обуславливает высокую эффективность их использования для целей фиторемедиации.

6. Обнаружено, что загрязнение водной среды индуцирует формирование у водных макрофитов ответных реакций, связанных с увеличением в листьях содержания растворимых белков и небелковых тиолсодержащих соединений, повышением количества фотосинтетических пигментов (хлорофиллов и каротиноидов), увеличением активности фермента каталазы. Изменение данных показателей повышает адаптивные возможности водных растений и определяет их устойчивость к загрязнению среды обитания.

7. В результате проведенных исследований определены коэффициенты биологического накопления пяти металлов у разных видов макрофитов; выделены группы водных растений, различающихся по аккумулятивной способности; уточнены виды, устойчивые к многокомпонентному загрязнению водной среды. Материалы исследований являются научной основой для прогнозирования трансформации видового состава сообщества при усилении антропогенного воздействия, а также биомониторинга и фиторемедиации водных экосистем.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

Статьи из изданий, рекомендованных ВАК:

1. Борисова Г.Г., Чукина Н.В., Малева М.Г. Использование гидрофитов для биоиндикации и фиторемедиации загрязненных водных объектов // Водное хозяйство России. 2006. №2. С. 30–40.

2. Чукина Н.В., Борисова Г.Г. Структурно-функциональные показатели высших водных растений из местообитаний с разным уровнем антропогенного воздействия // Биология внутренних вод. 2010. №1. С. 49–56.

3. Борисова Г.Г., Кислицина М.Н., Чукина Н.В. Исследование токсического действия фенольных соединений на водные растения // Водное хозяйство России. 2010. №4. С. 94–103.

Другие работы:

4. Борисова Г.Г., Чукина Н.В. Проблемы биоиндикации загрязнения водных объектов промышленных зон с использованием гидрофитов // Материалы Междунар. науч. конф. «Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон», г. Санкт-Петербург. С.-Пб.: Крисмас, 2006. С. 51–52.

5. Борисова Г.Г., Чукина Н.В. Использование гидрофитов в качестве индикаторов загрязнения водных объектов тяжелыми металлами // Сборник докл. 7-го Междунар. конгресса «Вода: экология и технология», г. Москва. Ч. II. М., 2006. С. 977–978.

6. Чукина Н.В. Активность каталазы в листьях гидрофитов в зависимости от степени загрязнения среды обитания // Материалы 9-й Междунар. конф. молодых ботаников, г. Санкт-Петербург. С.-Пб., 2006. С. 219.

7. Борисова Г.Г., Чукина Н.В. Физиолого-биохимические механизмы адаптации к загрязнению среды обитания тяжелыми металлами // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем: Тез. докл. Междунар. конф., г. Санкт-Петербург. С.-Пб., 2006. С. 24.

8. Чукина Н.В. Пути адаптации высших водных растений к загрязнению среды обитания (на примере *Elodea canadensis* Rich.) // Экология в меняющемся мире: Сборник материалов конференции молодых ученых / ИЭРиЖ УрО РАН.: Материалы докладов. Екатеринбург: Изд-во «Академкнига», 2006. С. 286–287.

9. Чукина Н.В., Борисов А.П. Изменение структурно-функциональных показателей гидрофитов при загрязнении водной среды // Экология: от Арктики до Антарктики: Сборник материалов конф. молодых ученых / ИЭРиЖ УрО РАН. Екатеринбург: Изд-во «Академкнига», 2007. С. 355–359.

10. Борисова Г.Г., Чукина Н.В., Малева М.Г. Аккумуляция гидрофитами тяжелых металлов в зависимости от их содержания в водной среде // IX Международный симпозиум и выставка «Чистая вода России-2007»: Статьи и тезисы. Екатеринбург, 2007. С. 66–71.

11. Борисова Г.Г., Чукина Н.В. Влияние загрязнения среды обитания на структурно-функциональные показатели гидрофитов // Материалы докладов Междунар. конф. «Современная физиология растений: от молекул до экосистем». Ч. 2. Сыктывкар, 2007. С. 40–42.

12. Чукина Н.В., Борисова Г.Г. Ответные реакции гидрофитов на загрязнение водной среды // Экологическая безопасность горнопромышленных регионов: Сборник материалов 1-го Уральского Междунар. эколог. конгресса. Т. II. Екатеринбург, 2007. С. 36–41.

13. Чукина Н.В. Влияние загрязнения водной среды на химический состав листьев гидрофитов // Материалы докл. XIII молодежной школы-конф. молодых ученых / ИБВВ РАН. Борок, 2007. С. 290–296.
14. Борисова Г.Г., Чукина Н.В. Исследование химического состава гидрофитов при разных уровнях воздействия на водные экосистемы // Водное хозяйство России. 2008. № 2. С. 68–82.
15. Чукина Н.В., Борисова Г.Г., Крашенинникова О.В., Коромыслова М.А. Изучение антиоксидантных систем у разных видов гидрофитов при загрязнении среды обитания // Проблемы биоэкологии и пути их решения: материалы Междунар. науч. конф. – Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2008. С. 445–447.
16. Чукина Н.В., Борисова Г.Г., Коннова А.Б. Исследование количественных показателей мезофилла листа гидрофитов при загрязнении водной среды // Тез. докл. Междунар. конф. «Физико-химические основы структурно-функциональной организации растений». Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2008. С. 432–433.
17. Чукина Н.В., Борисова Г.Г. К вопросу об использовании гидрофитов для биомониторинга водных объектов // Экологические проблемы промышленных регионов: Материалы 8-й Всерос. научно-практ. конф. Екатеринбург, 2008. С. 60–62.
18. Чукина Н.В., Борисова Г.Г., Крашенинникова О.В., Судакова Н.Д., Кислицина М.Н. Действие кадмия и марганца на содержание водорастворимых антиоксидантов у *Ceratophyllum demersum* и *Potamogeton alpinus* // Физико-химические механизмы адаптации растений к антропогенному загрязнению в условиях Крайнего Севера: тез. докл. Междунар. науч. конф. Апатиты, 2009. С. 357–359.
19. Борисова Г.Г., Кислицина М.Н., Крашенинникова О.В., Чукина Н.В., Судакова Н.Д. Активность полифенолоксидазы в листьях *Potamogeton crispus* при инкубировании в водной среде с различными концентрациями фенола // Там же. С. 66–68.
20. Борисова Г.Г., Кислицина М.Н., Крашенинникова О.В., Чукина Н.В., Судакова Н.Д. Исследование механизмов детоксикации фенолов гидрофитами // Материалы I Междунар. науч. практич. конф. «Эколого-биологические проблемы Сибири и сопредельных территорий». Нижневартовск: Изд-во Нижневартовского ун-та, 2009. С. 63–67.
21. Чукина Н.В., Борисова Г.Г., Малёва М.Г. Показатели мезоструктуры фотосинтетического аппарата гидрофитов из местообитаний с разным уровнем антропогенного воздействия // Казанская наука. 2009. № 1. С. 8–13.
22. Chukina N.V., Borisova G.G. Antioxidant responses of aquatic macrophytes to water pollution // Annual Main Meeting of the Society for Experimental Biology, Prague. Czech Republic. 2010. Abstract book. P. 325.
23. Maleva M.G., Chukina N.V., Borisova G.G., Kislicyana M.N. Antioxidant status of aquatic macrophytes with the high accumulation of metals —the importance for phytoremediation // Abstracts of the Central European congress of Life sciences «Eurobiotech 2010», Krakow. Poland. 2010. P. 10.

24. Борисова Г.Г., Чукина Н.В. Исследование действия тяжелых металлов на содержание пролина в листьях гидрофитов // «Биологические системы: устойчивость, принципы и механизмы функционирования»: материалы II Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Ч.1. Нижний Тагил, 2010. С. 101–103.

25. Кислицина М.Н., Чукина Н.В., Борисова Г.Г. Влияние фенольных соединений на активность полифенолоксидазы и содержание флавоноидов в листьях *Elodea densa* Planch. // Материалы докл. I (VII) Междунар. конф. по водным макрофитам «Гидробиотика 2010». Ярославль: «Принт Хаус», 2010. С. 152–154.

26. Кислицина М.Н., Чукина Н.В., Борисова Г.Г. Изменение параметров мезоструктуры листа *Elodea densa* Planch. под действием органических и неорганических загрязнителей // Материалы Всерос. конф. с междунар. участ. молодых ученых «Биология будущего: традиции и инновации». Екатеринбург, 2010. С. 124–126.