

АДАПТИВНЫЕ РЕАКЦИИ АДВЕНТИВНОГО ВИДА *LEMNA GIBBA* В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНОЙ СРЕДЫ*

Д.А. Щукина, Н.В. Чукина, М.Г. Малева, Г.Г. Борисова

E-mail: postnikdaria@rambler.ru

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ: Представлены результаты изучения адаптивных реакций адвентивного макрофита *Lemna gibba* L. (ряска горбатая) при загрязнении водной среды тяжелыми металлами. В условиях высокой техногенной нагрузки на водные экосистемы некоторые чужеродные виды способны к быстрому распространению и вытеснению представителей аборигенной флоры. Выявление физиолого-биохимических механизмов устойчивости данных видов, способствующих их успешному расселению на новые территории, приобретает особое значение.

Проведены исследования (июль 2016–2017 гг.) по изучению аккумулятивных способностей в отношении тяжелых металлов (никель, медь, цинк, марганец и железо) и некоторых морфофизиологических параметров *L. gibba* – одного из представителей адвентивной флоры Среднего Урала. Растительный материал и образцы поверхностных вод отобраны из двух водотоков Свердловской области, различающихся уровнем техногенного воздействия: р. Исеть (г. Арамилы) и ее приток р. Сысерть (пос. Двуреченск). Обнаружено, что концентрации Cu, Ni и Mn в воде р. Исети в среднем в 1,5 раза выше, чем в р. Сысерти, а Zn – в 4 раза. Показано, что фронды исследуемого макрофита из р. Исети отличались более значительным накоплением металлов, крупными клетками мезофилла, более высоким содержанием фотосинтетических пигментов и повышенной активностью ферментов каталазы и полифенолоксидазы по сравнению с растениями из р. Сысерти. Сделан вывод о том, что выявленные у *L. gibba* физиолого-биохимические адаптации повышают ее конкурентоспособность и играют важную роль в освоении новых территорий, в т. ч. техногенно нарушенных.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водные макрофиты, инвазивные виды, загрязнение водных объектов, аккумуляция металлов, структурная организация мезофилла, водная экосистема.

В настоящее время в России и за рубежом большое внимание уделяется изучению адвентивных видов, среди которых особый интерес представляют инвазивные [1, 2]. Согласно «Глобальной программе по инвазионным

* Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 02.А03.21.0006.

© Щукина Д.А., Чукина Н.В., Малева М.Г., Борисова Г.Г., 2020

видам», к этой категории относятся чужеродные виды, чье укоренение и распространение угрожает экосистемам, местообитаниям или видам и причиняет экономический или экологический ущерб [3]. Проведена инвентаризация инвазивных видов, выявлены пути их внедрения в растительные сообщества и некоторые эколого-физиологические особенности [1, 2, 4]. Однако физиолого-биохимические адаптации, способствующие натурализации инвазивных видов, остаются малоизученными. Значимость этих исследований усиливается в связи с принятием в 2002 г. Стратегии по инвазионным видам в Европе [5].

Одним из представителей адвентивной флоры многих регионов России является *Lemna gibba* L. (ряска горбатая) – плавающий водный макрофит из семейства Lemnaceae, являющийся агрессивным инвазивным видом, предпочитающим произрастать в эвтрофных водных экосистемах – канавах, прудах, озерах. Благодаря высокой конкурентоспособности по отношению к освещенности и поглощению питательных веществ, ряска горбатая способна становиться монокультурой, образуя густой плавающий ковер [6–8]. До недавнего времени *L. gibba* не имела широкого распространения в умеренных областях северного полушария, в т. ч. и на территории России, из-за климатических особенностей этих регионов [7]. В последние годы в отечественной и зарубежной литературе все чаще появляются сообщения о быстром распространении этого вида на территории Европы и России, особенно в водных объектах, подвергающихся антропогенному эвтрофированию [9–11].

К настоящему времени опубликовано значительное число работ, посвященных оценке аккумулятивной способности *L. gibba* и других видов ряски и их использованию для очистки сточных и рудничных вод от тяжелых металлов (ТМ) и других поллютантов *L. gibba* [12–16]. Однако большая часть исследований проводилась в лабораторных условиях. Представители семейства Lemnaceae, включая *L. gibba*, широко используются в экотоксикологических исследованиях благодаря своим маленьким размерам, быстрому размножению и способности аккумулировать ТМ и другие поллютанты [17–19].

В последние годы наблюдается активное расселение *L. gibba* по территории России, в т. ч. и Свердловской области [20]. Данный вид признан агрессивным, он способен вытеснять из водных экосистем представителей аборигенной флоры. Многие специалисты связывают возможность широкого расселения вида с усилением антропогенной эвтрофикации и загрязнением поверхностных вод, в особенности, водохранилищ. Ряска горбатая хорошо изучена как объект биомониторинга окружающей среды и широко применяется в практике фиторемедиации [15]. Однако до сих пор остается открытым вопрос об адаптивных физиолого-биохимических механизмах,

способствующих натурализации данного вида в водных объектах с повышенной техногенной нагрузкой.

Цель исследования – оценка аккумулятивной способности по отношению к металлам инвазивного макрофита *Lemna gibba* L. и выявление адаптивных морфофизиологических параметров растений этого вида из местообитаний с разной степенью антропогенного воздействия.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования – *L. gibba* из водотоков Свердловской области с разным уровнем техногенной нагрузки. *Lemna gibba* L. (ряска горбатая) – высшее водное растение. Характерной особенностью *L. gibba* являются округлые или обратнойцевидные стеблевые пластинки длиной до 7 мм (фронды или листецы), плавающие на поверхности или погруженные в воду.

Отбор проб поверхностных вод и растительного материала (фрондов *L. gibba*) осуществляли в июле 2016–2017 гг. из р. Исети (г. Арамиль) и р. Сысерти (пос. Двуреченск).

Исеть – левый приток р. Тобол, берет начало на восточном склоне Среднего Урала. Река является не только самым загрязненным притоком Тобола, но и одной из наиболее загрязненных рек России [21]. Согласно данным Ежегодника качества поверхностных вод РФ, вода в Исети в районе г. Арамили в 2017 г. оценивалась как «экстремально грязная». Наиболее характерными загрязняющими веществами являлись органические вещества (по БПК₅ и ХПК), аммонийный и нитритный азот, фосфаты, фенолы, соединения железа, меди, цинка, марганца, концентрации которых нередко существенно превышали ПДК_{рх} [21].

Река Сысерть – правый приток Исети. Вода в Сысерти характеризуется повышенными концентрациями соединений марганца, железа, легкоокисляемых органических веществ [21]. Но в целом уровень загрязненности, по сравнению с р. Исеть, существенно ниже. К тому же, объектами исследования были растения, обитающие ниже Нижне-Сысертского водохранилища, являющегося источником питьевого водоснабжения г. Каменск-Уральского.

Содержание ТМ (никель, медь, цинк, марганец, железо) в воде и фрондах *L. gibba* определяли с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой iCAP 6500 Duo («Thermo Scientific», США) после мокрого озоления 70 % HNO₃.

Анализ анатомо-морфологических параметров фрондов ряски проводили на растительном материале, фиксированном в 3,5 % растворе глутарового альдегида в фосфатном буфере (рН 7,2). Для фиксации использовали 20 фрондов из каждого местообитания. Определение количественных показателей мезофилла (площадь поверхности, объем, количество клеток и хлоропластов) проводили в 30-кратной повторности по методике [22].

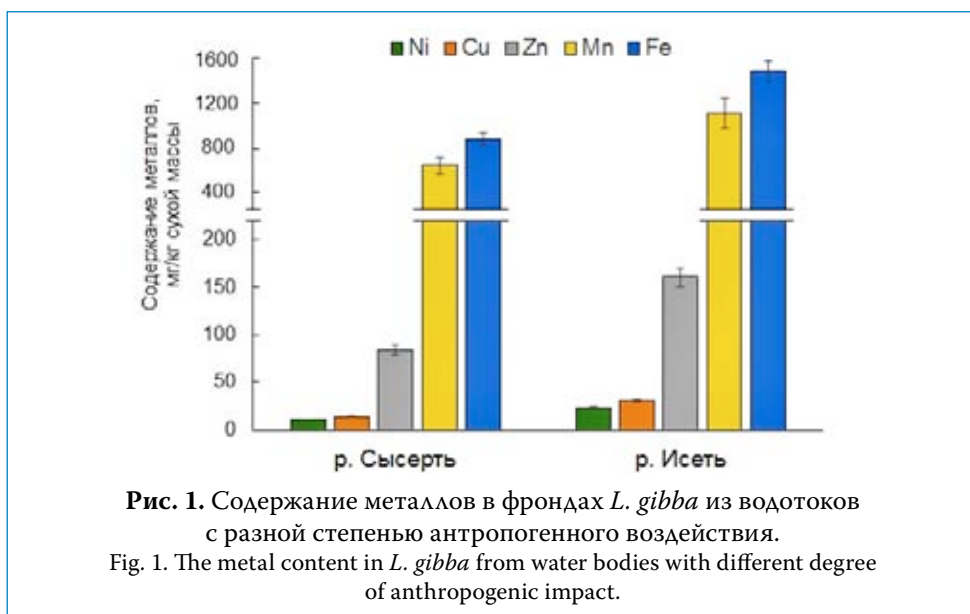
Содержание хлорофиллов (Хл *a*, Хл *b*) и каротиноидов определяли спектрофотометрически («APEL» PD-303UV) при длинах волн 440, 649 и 665 нм после экстракции в 80 % водном растворе ацетона и рассчитывали согласно [23]. Активность фермента полифенолоксидазы выявляли титриметрическим методом с использованием аскорбиновой кислоты [24], активность каталазы – спектрофотометрически с использованием метода Эйби с некоторыми изменениями [25]. Определение содержания ТМ, фотосинтетических пигментов, активности полифенолоксидазы и каталазы проводили в трех биологических повторностях. Достоверность различий между средними оценивали в соответствии с непараметрическим критерием Манна–Уитни при уровне значимости $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении исследований особое внимание уделено таким ТМ, как никель, медь, цинк, марганец и железо, поскольку их концентрации в водотоках Свердловской области, как правило, в несколько раз превышают ПДК [21, 26]. Определение концентраций этих ТМ в исследуемых водотоках показало, что содержание Cu, Ni и Mn в Исети в среднем в 1,5, а Zn – в 4 раза выше, чем в р. Сысерти, тогда как по железу оно было примерно одинаковым. Содержание металлов в фрондах *L. gibba* из р. Исети также было существенно (в среднем в 2 раза) выше по сравнению с растениями из р. Сысерти (рис. 1). Из изученных металлов в ряске превалировали железо и марганец, в меньшей степени она накапливала никель и медь.

Коэффициенты биологического накопления металлов ряской горбатой составили следующий восходящий ряд: Ni < Cu < Fe < Zn < Mn. В среднем содержание в фрондах *L. gibba* меди, никеля и железа превышало их концентрации в поверхностных водах в 3000 раз, цинка – в 6000 раз, марганца – в 19 000 раз.

Важными факторами, обеспечивающими устойчивость фотосинтетического аппарата растений к различным стрессорам, являются его структурно-функциональные перестройки. Изменение параметров мезоструктуры фотосинтетического аппарата, под которой понимается клеточный и тканевой уровень его организации, рассматривается как существенное проявление регуляции фотосинтеза на морфогенетическом уровне, обеспечивающее адаптацию растительных организмов к экологическим условиям [22]. Изучение параметров ассимиляционного аппарата растений в условиях стресса, в т. ч. под воздействием стрессоров химической природы, имеет важное значение, поскольку их изменение можно рассматривать как защитно-приспособительную реакцию, которая отличается медленными темпами по сравнению с другими адаптациями.



Для ряски горбатой характерен гомогенный тип мезофилла. Результаты определения параметров мезоструктуры листа *L. gibba* из рек Исети и Сысерти приведены в табл. 1. Растения из Исети имели более крупные клетки мезофилла: площадь поверхности в 1,7, объем – в 1,9 раз выше, чем у ряски из р. Сысерти. Наблюдалась также тенденция к увеличению их числа по сравнению с р. Сысерть (на 10 %).

Увеличение размеров клеток ряски горбатой из р. Исети, вероятно, связано с повышенным накоплением ТМ и других химических элементов в фрондах изученных растений в условиях более значительной антропогенной нагрузки. Ранее было показано, что в фрондах ряски горбатой, а также в листьях других водных макрофитов, при повышенном уровне в среде металлов происходит накопление белковых и небелковых тиолов [26]. Предполагается, что ионы ТМ после связывания их с фитохелатинами в цитоплазме транспортируются в вакуоль [27]. Кроме того, из цитоплазмы в вакуоль поступают свободные ионы металлов, следовательно, происходит увеличение объема этой органеллы за счет поступления воды для поддержания водного потенциала клеток. Полученные закономерности согласуются с работами О.А. Капитоновой [28], где отмечено, что фронды ряски малой, произрастающей в условиях промышленного загрязнения водной среды, отличаются более крупными клетками, что является следствием поступления избыточного количества поллютантов непосредственно из водной среды.

Таблица 1. Показатели мезоструктуры *L. gibba* из водотоков с разной степенью антропогенного воздействия
Table 1. The mesostructure parameters of *L. gibba* from water bodies with different degree of anthropogenic impact

Параметр, единицы измерения	р. Сысерть	р. Исеть
Площадь поверхности клетки, тыс. мкм ²	4,4 ± 0,2	7,6 ± 0,6*
Объем клетки, тыс. мкм ³	25,0 ± 2,0	47,9 ± 4,4*
Число клеток /см ² , шт.	245,6 ± 8,2	271,1 ± 11,7
Площадь поверхности хлоропласта, мкм ²	115,0 ± 5,2	83,1 ± 3,4*
Объем хлоропласта, мкм ³	120,1 ± 7,3	74,5 ± 4,5*
Число хлоропластов на клетку, шт.	38,3 ± 2,5	23,2 ± 3,1*
Число хлоропластов 10 ⁶ /см ² , шт.	2,8 ± 0,4	1,0 ± 0,2*

Примечание: * – достоверные различия между исследуемыми водными объектами при $p < 0,05$.

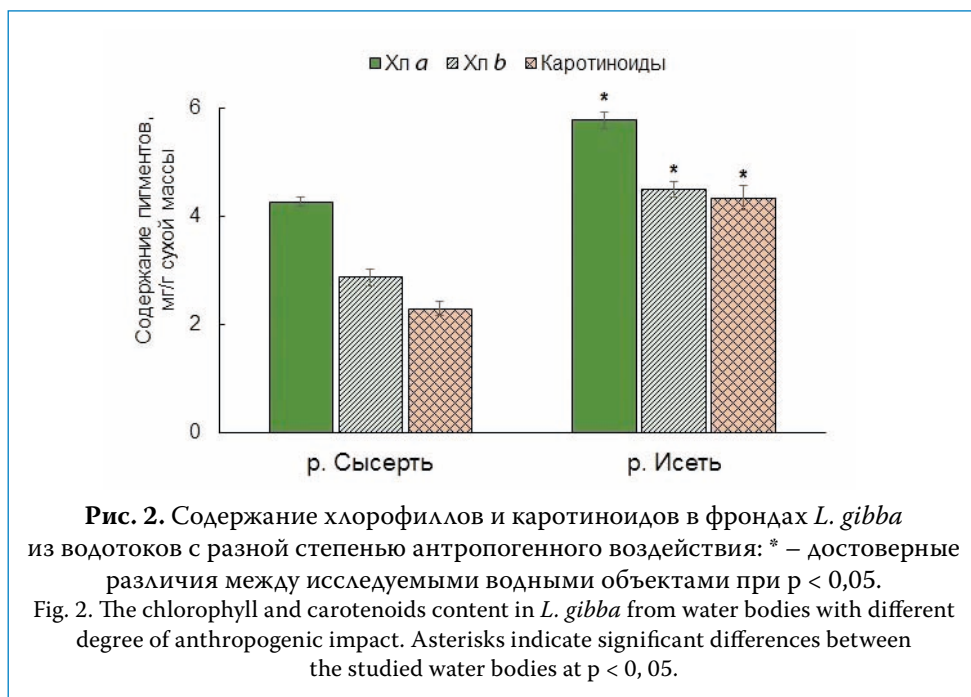
Одной из причин увеличения поверхности и объема клеток мезофилла у *L. gibba* из р. Исети может быть повышенный уровень азота в поверхностных водах. Как было отмечено в [21], изученные водотоки различаются по содержанию не только металлов, но и аммонийного и нитратного азота. Имеются данные о том, что повышение концентрации азота в среде обитания может способствовать увеличению размеров клеток мезофилла [29]. Вероятно, эти структурные перестройки можно расценивать как проявление адаптивных реакций в условиях загрязнения, поскольку инактивация ТМ может происходить не только за счет различных хелатирующих веществ, но и благодаря разбавлению концентрации поллютантов в большем объеме.

Оценка параметров хлоропластов *L. gibba* показала, что их размеры и количество в расчете как на клетку, так и на единицу поверхности существенно ниже в фрондах ряски горбатой из р. Исети. Известно, что количественные характеристики хлоропластов могут изменяться при изменении размеров вакуоли [22]. Очевидно, уменьшение площади поверхности, объема и числа хлоропластов в мезофилле ряски, произрастающей в условиях повышенного загрязнения водной среды, может быть связано с увеличением размеров вакуоли вследствие накопления поллютантов.

Избыток металлов в клетках может вызывать структурные изменения в хлоропластах, ингибировать ключевые ферменты синтеза хлорофилла, а также вызывать разрушение молекул пигментов [30]. Тем не менее, анализ содержания фотосинтетических пигментов в фрондах *L. gibba* показал, что при повышении уровня загрязнения водной среды количество фотосинтетических пигментов возрастало (рис. 2). Это свидетельствует о высокой

устойчивости пигментного комплекса ряски горбатой к повышенным концентрациям металлов. Увеличение содержания хлорофиллов *a* и *b* у ряски из р. Исети составило в среднем 45 %, в то время как содержание каротиноидов повышалось более значительно – почти в два раза.

Степень активности фотосинтетического аппарата часто оценивают по соотношению фотосинтетических пигментов. Как правило, эти соотношения у растений достаточно стабильны, однако существенно изменяются при стрессе. Исследование не выявило достоверных различий по отношению хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* у *L. gibba* из разных местообитаний, в то время как отношение суммы хлорофиллов к каротиноидам у ряски из Исети было достоверно ниже (табл. 2). Это объясняется более значительным ростом их количества в условиях загрязнения водной среды.



Увеличение содержания каротиноидов при повышенной антропогенной нагрузке связано со способностью этих пигментов взаимодействовать с активными формами кислорода, тем самым препятствуя возникновению окислительного стресса. Повышение количества каротиноидов можно рассматривать как защитно-приспособительную реакцию, направленную на снижение уровня окислительного стресса, возникающего при действии ТМ и других поллютантов.

Проведенное исследование также показало, что отношение Хл *b* + каротиноиды / Хл *a*, характеризующее долю антенных форм пигментов, у *L. gibba* из Исети существенно увеличивалось (табл. 2). Техногенное воздействие часто приводит к повышению мутности воды и снижению поглощения света. Возрастание количества хлорофилла *b* и каротиноидов могло способствовать усилению светособирающей функции пигментного комплекса изученных макрофитов.

Как было показано выше, число хлоропластов и их размеры у ряски из р. Исети были ниже, чем в Сысерти. При этом растения отличались более высоким содержанием фотосинтетических пигментов, что свидетельствует о повышении функциональной активности хлоропластов у изученных растений при загрязнении водной среды. Увеличению количества хлорофиллов *a* и *b* в фрондах ряски из р. Исети могло также способствовать повышенное содержание в воде таких металлов, как железо, магний, медь, участвующих в процессах биосинтеза этих пигментов, а также значительное количество соединений азота, который входит в состав хлорофилла.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что адвентивный вид *Lemna gibba* обладает устойчивым к действию металлов пигментным аппаратом, следовательно, и высоким адаптивным потенциалом, и способен успешно произрастать в водных объектах, подвергающихся значительной техногенной нагрузке. Увеличение содержания фотосинтетических пигментов можно рассматривать как компенсаторную адаптивную реакцию, направленную на поддержание фотосинтетической функции растений в неблагоприятных условиях произрастания.

Таблица 2. Соотношение фотосинтетических пигментов в фрондах *L. gibba* из водотоков с разной степенью антропогенного воздействия
Table 2. Relation of photosynthetic pigments in *L. gibba* from water bodies with different degree of anthropogenic impact

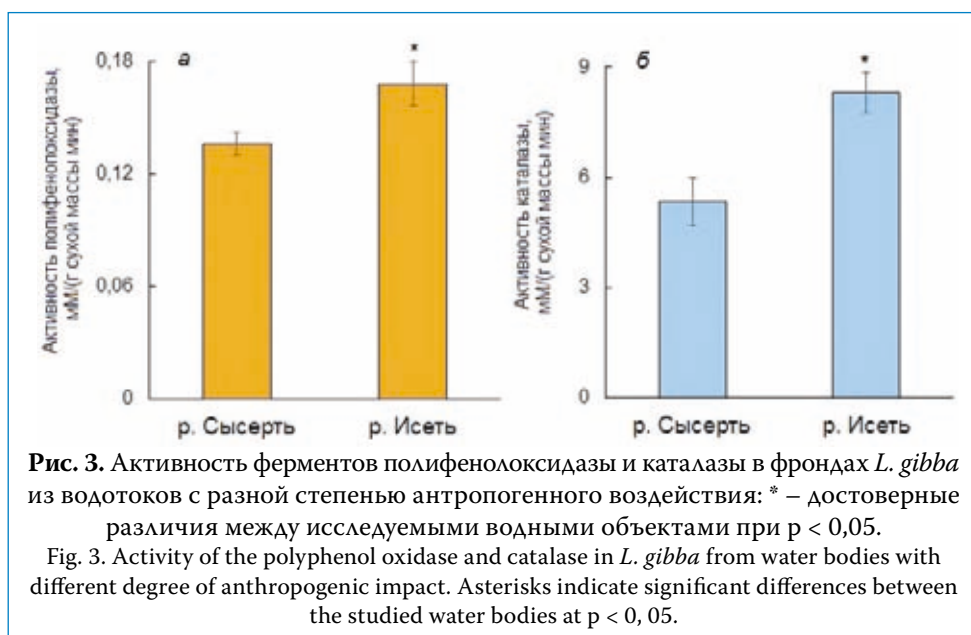
Соотношение пигментов	р. Сысерть	р. Исеть
Хл <i>a</i> / Хл <i>b</i>	1,5 ± 0,1	1,3 ± 0,0
Сумма Хл (<i>a</i> + <i>b</i>) / каротиноиды	3,2 ± 0,3	2,4 ± 0,1*
Сумма (Хл <i>b</i> + каротиноиды) / Хл <i>a</i>	1,2 ± 0,0	1,5 ± 0,1*

Примечание: * – достоверные различия между исследуемыми водными объектами при $p < 0,05$.

Важную роль в поддержании устойчивости растений к техногенному загрязнению играют физиолого-биохимические процессы, направленные на обезвреживание поллютантов либо нейтрализацию активных форм кислорода, накапливающихся в повышенном количестве при действии стрес-

совых факторов. Поэтому особый интерес представляет изучение активности важнейших ферментов, участвующих в защитных реакциях, к числу которых относятся полифенолоксидаза и каталаза.

Полифенолоксидаза, или дифенолоксидаза – медьсодержащий фермент, катализирующий гидроксилирование монофенолов и окисление дифенолов в хиноны. Кроме основной функции – окисления фенольных соединений, полифенолоксидаза может также активно участвовать в окислении других органических ксенобиотиков. В частности, этот фермент эффективно окисляет ароматические углеводороды, такие как бензол и толуол, осуществляя их гидроксилирование с дальнейшим образованием хинона [31]. Исследование показало, что активность полифенолоксидазы в фрондах ряски из р. Исети была выше на 20 %, чем в ее притоке (рис. 3). Очевидно, это связано с повышенными концентрациями в поверхностных водах фенольных соединений и ароматических углеводородов [21].



Каталаза – один из ферментов антиоксидантной системы, который широко распространен в растительных тканях. Система антиоксидантной защиты противостоит повреждающему эффекту свободных радикалов и активных форм кислорода, которые образуются в разных компартментах растительной клетки [26]. Сущность каталитического действия каталазы состоит в разложении токсичного для клеток пероксида водорода с выделением молекулярного кислорода. В условиях повышенной антропогенной

нагрузки (р. Исеть) активность каталазы в фрондах *L. gibba* возростала в 1,6 раз. Известно, что окислительный стресс может возникать в результате действия различных неблагоприятных факторов, включая и стрессоры химической природы. Повышенные концентрации ТМ (особенно таких редокс-активных, как медь, железо и марганец) могут способствовать продукции в листьях растений активных форм кислорода, приводящих к окислительной деструкции многих биополимеров. По-видимому, значительный уровень загрязненности Исети соединениями металлов и другими поллютантами является основной причиной активизации каталазы у ряски. Интенсификация физиолого-биохимических процессов, направленных на компенсацию токсического действия поллютантов в условиях повышенной антропогенной нагрузки, еще раз свидетельствует о высокой устойчивости этого адвентивного вида.

ВЫВОДЫ

Таким образом, исследование некоторых анатомо-морфологических и физиолого-биохимических параметров *Lemna gibba* из двух водотоков – рек Исети и Сысерти, различающихся степенью антропогенного воздействия, показало, что для *L. gibba* характерна высокая аккумулятивная способность по отношению к металлам: содержание в фрондах меди, никеля, железа, цинка и марганца превышало их концентрации в поверхностных водах в тысячи раз. Несмотря на это, растения данного вида продемонстрировали высокую жизнеспособность в условиях техногенного загрязнения среды благодаря компенсаторным перестройкам структурно-функциональной организации: увеличению размеров клеток мезофилла и содержания фотосинтетических пигментов (в наибольшей степени каротиноидов), а также активизации важнейших ферментов, участвующих в обезвреживании поллютантов и активных форм кислорода.

Полученные результаты позволяют предположить, что выявленные у *Lemna gibba* физиолого-биохимические адаптации играют важную роль в ее расселении на новые территории, в т. ч. техногенно нарушенные, и позволяют ей в условиях загрязнения природных вод быть более конкурентоспособным видом, чем многие аборигенные водные растения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Третьякова А.С., Куликов П.В. Адвентивный компонент флоры Свердловской области: биоэкологические особенности // Вестник Удмуртского университета. Сер. «Биология. Науки о Земле». 2014. № 1. С. 57–67.
2. Виноградова Ю.К., Майоров С.Р., Хорун Л.В. Черная книга флоры Средней России: чужеродные виды растений в экосистемах Средней России. М.: ГЕОС, 2010. 512 с.

3. Глобальная программа по инвазивным видам: Global Invasive Species Programme (GISP). Режим доступа: <https://www.gisp.org/> (дата обращения 05.07. 2019).
4. *Абрамова Л.М.* Новые данные по биологическим инвазиям чужеродных видов в Республике Башкортостан // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2014. Т. 19. № 4. С. 16–27.
5. Стратегия по инвазивным видам в Европе: European strategy on invasive alien species: Convention on the Conservation of European Wildlife and Habitats (Bern Convention) / Genovesi P. et al. // Council of Europe, 2004. № 18–137. Режим доступа: <https://www.cbd.int/doc/external/cop-09/bern-01-en.pdf> (дата обращения 05.07. 2019).
6. *Demirezen D., Aksoy A., Uruç K.* Effect of population density on growth, biomass and nickel accumulation capacity of *Lemna gibba* (Lemnaceae) // Chemosphere. 2007. Vol. 66. No. 3. P. 553–557.
7. *Landolt E.* Morphological differentiation and geographical distribution of the *Lemna gibba-Lemna minor* group // Aquatic Botany. 1975. Vol. 1. P. 345–363.
8. *Scheffer M., Szabo S., Gragnani A., van Nes E.H., Rinaldi S., Kautsky N., Norberg J., Roijackers R.M.M., Franken R.J.M.* Floating plant dominance as a stable state // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2003. Vol. 100. P. 4040–4045.
9. *Капитонова О.А.* Ряска горбатая (*Lemna gibba*, Lemnaceae) – чужеродный вид во флоре Западной Сибири // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии: сб. науч. ст. по материалам XVII Межд. науч.-практ. конф. (Барнаул, 24–27 мая 2018 г.). Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2018. С. 83–86.
10. *Панасенко Н.Н., Романова Ю.Н.* *Lemna gibba* L. в Брянской области // Вестник Брянского государственного университета. 2012. № 4 (1). С. 143–145.
11. *Хорун Л.В.* О возможностях определения степени отсроченности инвазионной опасности заносных видов растений // Российский журнал биологических инвазий. 2011. Т. 4. № 3. С. 89–104.
12. *Rejmánková E.* Comparison of *Lemna gibba* and *Lemna minor* from the production ecological viewpoint // Aquatic Botany. 1975. Vol. 1. P. 423–427.
13. *Galczyńska M., Mankowska N., Milke J., Busko M.* Possibilities and limitations of using *Lemna minor*, *Hydrocharis morsus-ranae* and *Ceratophyllum demersum* in removing metals with contaminated water // Journal of Water and Land Development. 2019. No. 40 (I–III). P. 161–173.
14. *Sasmaz A., Dogan I.M., Sasmaz M.* Removal of Cr, Ni, and Co in the water of chromium mining areas by using *Lemna gibba* L. and *Lemna minor* L. // Water and Environment Journal. 2016. No. 30 (3–4). P. 235–242.
15. *Mkandawire M., Taubert B., Dudel E.G.* Capacity of *Lemna gibba* L. (duckweed) for uranium and arsenic phytoremediation in mine tailing waters // International Journal of Phytoremediation. 2004. Vol. 6. No. 4. P. 347–362.
16. *Yilmaz D.D.* Effects of salinity on growth and nickel accumulation capacity of *Lemna gibba* (Lemnaceae) // Journal of Hazardous Materials. 2007. Vol. 147. P. 74–77.
17. *Böcü H., Yakar A., Türker O. C.* Assessment of *Lemna gibba* L. (duckweed) as a potential ecological indicator for contaminated aquatic ecosystem by boron mine effluent // Ecological Indicators. 2013. Vol. 29. P. 538–548.

18. Greenberg B.M., Huang X.D., Dixon D.G. Applications of the aquatic higher plant *Lemna gibba* for ecotoxicological assessment // Journal of Aquatic Ecosystem Health. 1992. Vol. 1. No. 2. P. 147–155.
19. Mkandawire M., Dubel E.G. Assignment of *Lemna gibba* L. (duckweed) bioassay for in situ ecotoxicity assessment // Aquatic Ecology. 2005. Vol. 39. P. 151–165.
20. Третьякова А.С. Закономерности распределения чужеродных растений в антропогенных местообитаниях Свердловской области // Российский журнал биологических инвазий. 2015. Т. 8. № 4. С. 117–128.
21. Ежегодник качества поверхностных вод РФ за 2017 год с приложением / Сайт Гидрохимического института Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Режим доступа: <http://gidrohim.com/node/72>.
22. Мокроносов А.Т., Борзенкова Р.А. Методика количественной оценки структуры и функциональной активности фотосинтезирующих тканей и органов // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 1978. Т. 61. С. 119–133.
23. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic membranes // Methods in Enzymology. 1987. Vol. 148. P. 350–382.
24. Починок Х.Н. Методы биохимического анализа растений. Киев: Наук. думка, 1976. 234 с.
25. Методы оценки антиоксидантного статуса растений: уч.-метод. пособие / Г.Г. Борисова и др.; отв. ред. Н.В. Чукина. Екатеринбург: УрГУ, 2012. 72 с.
26. Borisova G., Chukina N., Maleva M., Kumar A., Prasad M.N.V. Thiols as biomarkers of heavy metal tolerance in the aquatic macrophytes of Middle Urals, Russia // International Journal of Phytoremediation. 2016. Vol. 18. No. 10. P. 1037–1045.
27. Hall J.L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance // Journal of Experimental Botany. 2002. Vol. 53. No. 366. P. 1–11.
28. Kapitonova O.A. Specific anatomical features of vegetative organs in some macrophyte species under conditions of industrial pollution // Russian Journal of Ecology. 2002. Vol. 33. No. 1. P. 59–61.
29. Нагалецкий В.Я., Николаевский В.Г. Экологическая анатомия растений: уч. пос. Краснодар: Изд-во Кубан. гос. ун-та, 1981. 88 с.
30. Photosynthetic pigments: chemical structure, biological function and ecology. Syktyvkar: Komi Sci. Centre Ural Branch RAS, 2014. 448 с.
31. Квеситадзе Г.И., Хатисашвили Г.А., Садуншвили Т.А., Евстигнеева З.Г. Метаболизм антропогенных токсикантов в высших растениях. М.: Наука, 2005. 190 с.

Для цитирования: Шукина Д.А., Чукина Н.В., Малева М.Г., Борисова Г.Г. Адаптивные реакции адвентивного вида *Lemna gibba* в условиях загрязнения водной среды // Водное хозяйство России. 2020. № 1. С. 108–123.

Сведения об авторах:

Шукина Дарья Алексеевна, аспирант, кафедра экспериментальной биологии и биотехнологий, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Институт естественных наук и математики, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: postnikdaria@rambler.ru

Чукина Надежда Владимировна, канд. биол. наук, доцент, кафедра экспериментальной биологии и биотехнологий, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Институт естественных наук и математики, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: nady_dicusar@mail.ru

Малева Мария Георгиевна, канд. биол. наук, доцент, доцент кафедры экспериментальной биологии и биотехнологий, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Институт естественных наук и математики, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: maria.maleva@mail.ru

Борисова Галина Григорьевна, д-р геогр. наук, профессор, кафедра экспериментальной биологии и биотехнологий, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Институт естественных наук и математики, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: Borisova59@mail.ru

ADAPTIVE REACTIONS OF THE ADVENTIVE SPECIES *LEMNA GIBBA* TO WATER POLLUTION

Daria A. Shchukina., Nadezhda V. Chukina., Maria G. Maleva, Galina G. Borisova

E-mail: postnikdaria@rambler.ru

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Abstract: The study is devoted to adventive macrophyte *Lemna gibba* L. (duckweed) adaptive reactions to pollution of water by heavy metals. Under the high technogenic impact on aquatic ecosystems, some invasive species quickly spread and crowd out of native flora. In this regard, studies of the physiological and biochemical mechanisms of these species tolerance, contributing to their successful resettlement are of particular importance. The results of two years of research (July 2016–2017) on the study of accumulative abilities in relation to heavy metals (nickel, copper, zinc, manganese and iron) and some morphophysiological parameters of *L. gibba* – one of the adventive flora representatives of the Middle Urals is presented. Plant material and surface water samples were taken from two water bodies of the Sverdlovsk region, differing in levels of technogenic impact: the Iset River (Aramil town) and its tributary the Sysert River (Dvurechensk town). It was found that Cu, Ni and Mn concentration in the Iset River were on average 1.5 times and Zn – 4.0 times higher than that in the Sysert River. It was shown that the fronds of the studied macrophyte from the habitat with an increased water pollution (the Iset River) were distinguished by a more significant accumulation of metals, larger mesophyll cells, a higher content of photosynthetic pigments and increased activity of catalase and polyphenol oxidase enzymes compared to plants from the water body with a lower level of pollution (the Sysert River). It is concluded that the physiological and biochemical adaptations revealed in *L. gibba* increase its competitiveness and play an important role in the development of new territories, including technologically disturbed ones.

Key words: aquatic macrophytes, invasive species, pollution of water bodies, metal accumulation, structural organization of mesophyll, photosynthetic pigments, polyphenol oxidase, catalase, plant resistance.

About the authors:

Daria A. Shchukina, graduate student of the Department of Experimental Biology and Biotechnology, B.N. Yeltsin Ural Federal University, Institute of Natural Sciences and Mathematics, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; e-mail: postnikdaria@rambler.ru

Nadezhda V. Chukina, Ph.D., Associate Professor of the Department of Experimental Biology and Biotechnology B.N. Yeltsin Ural Federal University, Institute of Natural Sciences and Mathematics, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; e-mail: nady_dicusar@mail.ru

Maria G. Maleva, Ph.D., Docent, Associate Professor of the Department of Experimental Biology and Biotechnology, B.N. Yeltsin Ural Federal University, Institute of Natural Sciences and Mathematics, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; e-mail: maria.maleva@mail.ru

Galina G. Borisova, DSc, Senior Researcher, Professor of the Department of Experimental Biology and Biotechnology, B.N. Yeltsin Ural Federal University, Institute of Natural Sciences and Mathematics, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; e-mail: Borisova59@mail.ru

For citation: *Schukina D.A., Chukina N.V., Maleva M.G., Borisova G.G. Adaptive Reaction of the Adventive Species *Lemna gibba* to Water Pollution // Water Sector of Russia. 2020. No. 1. P. 108-123.*

REFERENCES

1. *Tretyakova A.S., Kulikov P.V.* Adventivnyy komponent flory Sverdlovskoy oblasti: bioekologicheskie osobennosti [Adventitious component of the Sverdlovsk region flora: bioecological characteristics] // Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya «Biologiya. Nauki o Zemle». 2014. № 1. Pp. 57–67.
2. *Vinogradova Y.K., Mayorov S.R., Khorun L.V.* Chernaya kniga flory Sredney Rossii: chuzherodnye vidy rasteniy v ekosistemakh Sredney Rossii [Black book of the flora of Central Russia. Invasive plant species in ecosystems of Central Russia]. Moscow: GEOS Publ.; 2010. 512 p.
3. Global Invasive Species Program (GISP) [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.gisp.org/>. Accessed 05 July 2019.
4. *Abramova L.M.* Novye dannye po biologicheskim invaziyam chuzherodnykh vidov v Respublike Bashkortostan [New data on biological invasions of alien species in the Republic of Bashkortostan]. Vestnik AN RB – Herald of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan. 2014. Vol. 19. No 4. Pp. 16–27.
5. European strategy on invasive alien species: Convention on the Conservation of European Wildlife and Habitats (Bern Convention) / Genovesi P. et al. // Council of Europe, 2004. № 18–137. [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.cbd.int/doc/external/cop-09/bern-01-en.pdf>. Accessed 05 July 2019.
6. *Demirezen D., Aksoy A., Uruç K.* Effect of population density on growth, biomass and nickel accumulation capacity of *Lemna gibba* (Lemnaceae) // Chemosphere. 2007. Vol. 66. № 3. P. 553–557.
7. *Landolt E.* Morphological differentiation and geographical distribution of the *Lemna gibba*-*Lemna minor* group // Aquatic Botany. 1975. Vol. 1. P. 345–363.
8. *Scheffer M., Szabo S., Gragnani A., van Nes E.H., Rinaldi S., Kautsky N., Norberg J., Roijackers R.M.M., Franken R.J.M.* Floating plant dominance as a stable state // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2003. Vol. 100. P. 4040–4045.
9. *Kapitonova O.A.* Ryaska gorbataya (*Lemna gibba*, Lemnaceae) – chuzherodnyy vid vo flore Zapadnoy Sibiri [The gibbous duckweed (*Lemna gibba*, Lemnaceae) – an alien species in the flora of Western Siberia] // Problemy botaniki Yuzhnoy Sibiri i Mongolii: sb. nauch. st. po materialam XVII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Barnaul, 24–27 maya 2018). Barnaul: Izdatel'stvo Altayskogo gosudarstvennogo universiteta, 2018. Pp. 83–86.

10. *Panasenko N.N., Romanova Y.N. Lemna gibba L. v Bryanskoj oblasti [Lemna gibba in the Bryansk region] // Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta. 2012. № 4 (1). P. 143–145.*
11. *Khoroon L.V. O vozmozhnostyakh opredeleniya stepeni otsrochennosti invazionnoj opasnosti zanosnykh vidov rastenij [On possibilities of determination of degree of invasion threat delay of alien plant species] // Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invaziy. 2011. Vol. 4. № 3. Pp. 89–104.*
12. *Reymánková E. Comparison of Lemna gibba and Lemna minor from the production ecological viewpoint // Aquatic Botany. 1975. Vol. 1. P. 423–427.*
13. *Galczyńska M., Mankowska N., Milke J., Busko M. Possibilities and limitations of using Lemna minor, Hydrocharis morsus-ranae and Ceratophyllum demersum in removing metals with contaminated water // Journal of Water and Land Development. 2019. No 40 (I–III). P. 161–173.*
14. *Sasmaz A., Dogan I.M., Sasmaz M. Removal of Cr, Ni, and Co in the water of chromium mining areas by using Lemna gibba L. and Lemna minor L. // Water and Environment Journal. 2016. No 30 (3–4). P. 235–242.*
15. *Mkandawire M., Taubert B., Dudel E.G. Capacity of Lemna gibba L. (duckweed) for uranium and arsenic phytoremediation in mine tailing waters // International Journal of Phytoremediation. 2004. Vol. 6. No 4. P. 347–362.*
16. *Yilmaz D.D. Effects of salinity on growth and nickel accumulation capacity of Lemna gibba (Lemnaceae) // Journal of Hazardous Materials. 2007. Vol. 147. P. 74–77.*
17. *Böcük H., Yakar A., Türker O.C. Assessment of Lemna gibba L.(duckweed) as a potential ecological indicator for contaminated aquatic ecosystem by boron mine effluent // Ecological Indicators. 2013. Vol. 29. P. 538–548.*
18. *Greenberg B.M., Huang X.D., Dixon D.G. Applications of the aquatic higher plant Lemna gibba for ecotoxicological assessment // Journal of Aquatic Ecosystem Health. 1992. Vol. 1. No 2. P. 147–155.*
19. *Mkandawire M., Dubel E.G. Assignment of Lemna gibba L. (duckweed) bioassay for in situ ecotoxicity assessment // Aquatic Ecology. 2005. Vol. 39. P. 151–165.*
20. *Tretyakova A.S. Zakonomernosti raspredelenija chuzherodnykh rastenij v antropogennykh mestoobitanijah Sverdlovskoj oblasti [Patterns of distribution of alien plants in anthropogenic habitats of the Sverdlovsk region] // Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invaziy. 2015. V. 8. № 4. Pp. 117–128.*
21. *Ezhegodnik kachestva poverkhnostnykh vod RF za 2017 god s prilozheniem / Sayt Gidrokhimicheskogo instituta Federal'noy sluzhby po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy. URL: <http://gidrohim.com/node/72>.*
22. *Mokronosov A.T., Borzenkova R.A. Metodika kolichestvennoy otsenki struktury i funktsional'noy aktivnosti fotosinteziruyushchikh tkaney i organov [Methodology for the quantitative assessment of the structure and functional activity of photosynthetic tissues and organs] // Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsiyi. 1978. V. 61. Pp. 119–133.*
23. *Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic membranes // Methods in Enzymology. 1987. Vol. 148. P. 350–382.*
24. *Pochinok K.N. Metody biokhimicheskogo analiza rasteniy [Methods of biochemical analysis of plants]. Kiev: Naukova dumka, 1976. 234 s.*
25. *Metody otsenki antioksidantnogo statusa rasteniy: [ucheb.-metod. posobie] [Methods for assessing the antioxidant status of plants] / G.G.Borisova i dr.; otv. red. N.V. Chukina. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta, 2012. 72 s.*

26. *Borisova G., Chukina N., Maleva M., Kumar A., Prasad M.N.V.* Thiols as biomarkers of heavy metal tolerance in the aquatic macrophytes of Middle Urals, Russia // *International Journal of Phytoremediation*. 2016. Vol. 18. No 10. P. 1037–1045.
27. *Hall J.L.* Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance // *Journal of Experimental Botany*. 2002. Vol. 53. No 366. P. 1–11.
28. *Kapitonova O.A.* Specific anatomical features of vegetative organs in some macrophyte species under conditions of industrial pollution // *Russian Journal of Ecology*. 2002. Vol. 33. No 1. P. 59–61.
29. *Nagalevskij V.Ja., Nikolaevskij V.G.* *Jekologicheskaja anatomija rastenij* [Ecological anatomy of plants]. Krasnodar: Izd-vo Kuban. gos. un-ta, 1981. 88 p.
30. *Photosynthetic pigments: chemical structure, biological function and ecology*. Syktyvkar: Komi Sci. Centre Ural Branch RAS, 2014. 448 p.
31. *Kvesitadze G.I., Hatisashvili G.A., Sadunishvili T.A., Evstigneeva Z.G.* *Metabolizm antropogennyh toksikantov v vysshih rastenijah* [Metabolism of anthropogenic toxicants in higher plants]. M.: Nauka, 2005. 190 p.