

Д.А. Щукина, Г.Г. Борисова, М.Г. Малева, А.В. Солоницына, П.Е. Новиков

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, postnikdaria@rambler.ru

АДАПТИВНЫЕ РЕАКЦИИ АДВЕНТИВНОГО МАКРОФИТА РЯСКИ ГОРБАТОЙ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОДНОЙ СРЕДЫ СИНТЕТИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

Одной из основных причин снижения биологического разнообразия и продуктивности биоценозов является процесс натурализации адвентивных видов растений, которые агрессивно вытесняют представителей местной флоры из их привычных местообитаний. Плавающий макрофит ряска горбатая (*Lemna gibba* L.) относится к таким видам. В последние годы этот вид активно расселяется по территории России: на сегодняшний день его распространение ограничено Западной Сибирью [Капитонова, 2018]. Несоответствие климатического режима северных регионов России эколого-биологическим требованиям вида несколько сдерживает дальнейшее расселение растения, что может свидетельствовать о начальной стадии колонизации несвойственных ему территорий. После нее можно ожидать ускорения микроэволюционных процессов с выработкой у инвазионных популяций адаптаций к климатическим условиям [Виноградова и др., 2010]. При этом ряска горбатая успешно осваивает антропогенно нарушенные местообитания [Третьякова, 2016; Капитонова, 2018].

К настоящему времени большинство гидроэкосистем характеризуются высокими уровнями химического загрязнения. Водные макрофиты подвергаются специфическому действию различных видов поллютантов, которые поступают в водоемы и водотоки в составе промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод. Особый интерес вызывает влияние синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ), или детергентов, чья доля содержания в сточных водах увеличивается из года в год [Мурзин и др., 2010]. Благодаря своей способности аккумулироваться на границах раздела фаз [Дюрягина и др., 2013] СПАВ могут накапливаться в водном поверхностном слое, изменяя его химические и физические характеристики: они способны аккумулировать другие загрязнители водной среды – углеводороды и тяжелые металлы [Шереметьева, Шумченко, 1990] – и влиять на показатель преломления света [Ахманов, Никитин, 2004]. Концентрации СПАВ могут достигать до 30 мг/л и вызывать разнообразные морфофизиологические реакции у гидробионтов, как, например, ингибирование их роста [Остроумов, 2004; Волкова, Сторожук, 2012].

В связи с этим актуальным становится изучение физиолого-биохимических механизмов адаптации адвентивных видов к воздействию поллютантов со специфическими свойствами, таких как СПАВ. Это позволит определить факторы успешной натурализации этих видов в условиях антропогенно нарушенных гидроценозов. В дальнейшем полученные результаты позволят оценить перспективы их распространения на новые территории и прогнозировать изменения состояния водных экосистем.

Цель работы – изучить ответные физиолого-биохимические адаптивные реакции ряски горбатой на кратковременное действие синтетических поверхностно-активных веществ (на примере моющих средств «Faigy», «Help» и полисорбата «Tween 20»).

Сбор растительного материала проводили в июле 2019 года из Северского пруда (Свердловская область). Фронды ряски горбатой помещали на 24 часа в модельные системы с дистиллированной водой с добавлением неионогенного СПАВ полисорбатного типа «Tween 20» (2 % раствор) и СПАВ-содержащих моющих средств: «Faigy» (5 % раствор) и «Help» (5 % раствор). Согласно фабричной упаковке, доля содержания анионных СПАВ в средстве для мытья посуды «Faigy» составляет 5–15 %, неионогенных СПАВ – меньше 5 %; в «Help» – анионные и неионогенные СПАВ составляют меньше 5 % (табл. 1). Контролем служили растения, инкубированные в воде без добавления моющих средств. Все физиолого-биохимические характеристики измеряли спектрофотометрически на PD-303UV («APEL», Япо-

Доля содержания СПАВ в модельных растворах

| Средство (источник СПАВ) | Концентрация в водном растворе, % | Исходная концентрация СПАВ в моющем средстве, % | | Доля содержания СПАВ в водном растворе, % | |
|--------------------------|-----------------------------------|---|-------------------|---|-------------------|
| | | анионные СПАВ | неионогенные СПАВ | анионные СПАВ | неионогенные СПАВ |
| «Fairy» | 5 | 15* | 5* | 0.75 | 0.25 |
| «Help» | 5 | 5* | 5* | 0.25 | 0.25 |
| Полисорбат «Tween 20» | 2 | – | 100 | – | 2 |

Примечание. * – соответствует верхней границе диапазона значений содержания.

ния). Содержание фотосинтетических пигментов определяли после экстракции в 80 % ацетоне и рассчитывали по Lichtenthaler [Lichtenthaler, 1987]. Содержание пероксида водорода и продуктов перекисного окисления липидов (малонового диальдегида, МДА) определяли согласно «Методам оценки антиоксидантного статуса растений» [Борисова и др., 2012]. Количество фенольных соединений измеряли с использованием реактива Фолина–Чокальтеу [Singleton et al., 1999]. Все эксперименты проводили в 2-х биологических и 4-х аналитических повторностях.

Обнаружено, что под действием всех исследованных моющих средств у ряски горбатой активизировались прооксидантные реакции и развивался окислительный стресс (рис.). У растений во всех модельных растворах наблюдалось усиление прооксидантных процессов по сравнению с контролем и резкое снижение содержания низкомолекулярных антиоксидантов (каротиноидов и фенольных соединений). По-видимому, это может быть связано с окислительной деструкцией биомолекул под действием избытка активных форм кислорода (АФК) и, возможно, с торможением процессов их восстановления и/или синтеза в клетке.

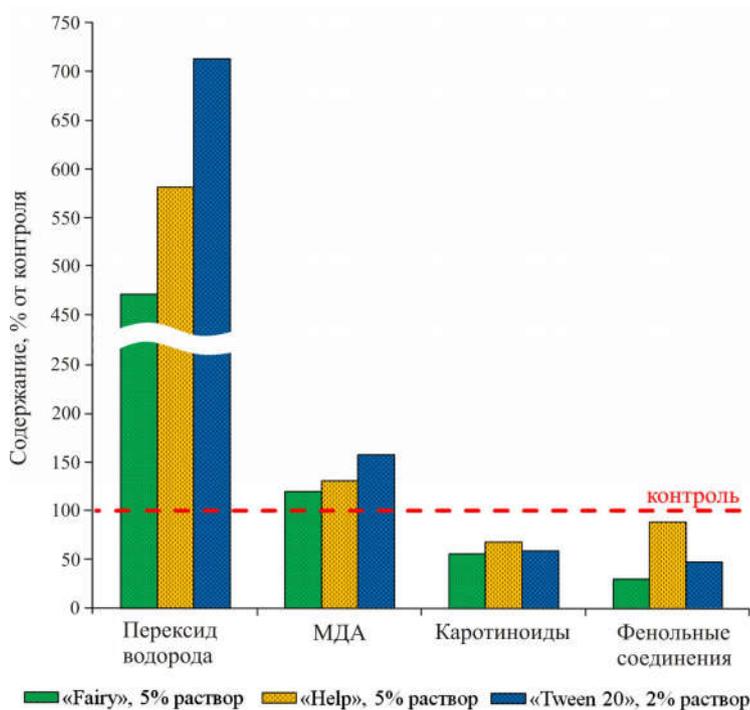


Рис. Прооксидантные (перексид водорода, МДА) и антиоксидантные (каротиноиды, фенольные соединения) реакции ряски горбатой на действие СПАВ моющих средств после 24 часа инкубирования.

Наиболее выраженная активизация прооксидантных реакций наблюдалась при добавлении полисорбата «Tween 20», поскольку количество в его модельном растворе поверхностно-активных веществ в 2 раза превышало суммарное содержание СПАВ в растворе моющего средства «Fairy», и в 4 раза – в растворе моющего средства «Help».

Уменьшение содержания фенольных соединений может быть обусловлено тем, что многие из них способны отдавать атом водорода из ОН-группы ароматического кольца для тушения и ликвидации свободных радикалов, окисляющих липиды и другие биомолекулы [Прадедова и др., 2011]. При этом происходило их окисление и дальнейшая деградация.

Проявление антиоксидантных свойств каротиноидов нередко сопровождается их окислительной

деструкцией. Как известно, каротиноиды не только принимают участие в поглощении квантов света, но и обладают антиоксидантной активностью. Молекулы каротиноидов, имеющие двойные связи, легко окисляются, конкурируя за АФК с другими биомолекулами, тем самым защищая последние от окисления [Стржалка и др., 2003].

Наиболее низкое содержание таких низкомолекулярных антиоксидантов, как фенольные соединения, было отмечено у растений при инкубировании в модельном растворе моющего средства «Fairy», что может быть связано с высокой долей содержания анионных СПАВ по сравнению с остальными модельными растворами.

Пигментный комплекс ряски горбатой продемонстрировал достаточно высокую устойчивость к кратковременному инкубированию в среде со СПАВ (табл. 2). При действии моющих средств «Fairy» и «Tween 20» на хлорофиллы отмечался эффект «гормезиса»: суммарное содержание этих пигментов возрастало по сравнению с контролем почти на 30 и 55 % соответственно. Отношение суммы хлорофиллов ($a + b$) к каротиноидам, характеризующее в целом светособирающую функцию пигментного комплекса, при добавлении СПАВ увеличивалось в среднем 2 раза. При этом была выявлена тенденция к снижению отношения суммы вспомогательных пигментов (Хл b + Каротиноиды) к основному (Хл a), характеризующего долю антенных форм, что объясняется уменьшением содержания в фрондах ряски каротиноидов.

Таблица 2

Ответные реакции пигментного аппарата ряски горбатой на кратковременное действие СПАВ

| Параметр, единица измерения | Контроль | «Fairy», 5 % раствор | «Help», 5 % раствор | «Tween 20», 2 % раствор |
|----------------------------------|-------------|-------------------------|------------------------|----------------------------|
| Хл a , мг/г сухого веса | 2.51 ± 0.09 | 3.14 ± 0.16* | 2.70 ± 0.21 | 4.52 ± 0.23* |
| Хл b , мг/г сухого веса | 1.89 ± 0.02 | 2.60 ± 0.11* | 1.92 ± 0.15 | 2.32 ± 0.08* |
| Каротиноиды, мг/г сухого веса | 0.71 ± 0.06 | 0.40 ± 0.01* | 0.49 ± 0.05 | 0.42 ± 0.03* |
| Хл ($a + b$), мг/г сухого веса | 4.40 ± 0.09 | 5.75 ± 0.28* | 4.62 ± 0.34 | 6.84 ± 0.15* |
| Хл a/b | 1.33 ± 0.05 | 1.21 ± 0.02 | 1.41 ± 0.08 | 1.97 ± 0.17* |
| Хл ($a + b$)/Каротиноиды | 6.31 ± 0.57 | 14.38 ± 0.56* | 9.62 ± 0.58* | 16.42 ± 0.79* |
| (Хл b + Каротиноиды)/Хл a | 1.04 ± 0.04 | 0.96 ± 0.02 | 0.90 ± 0.03* | 0.61 ± 0.05* |

Примечание. * – статистически значимые по сравнению с контролем различия (при $p < 0.05$).

Таким образом, проведенные исследования позволяют предположить, что ряска горбатая обладает достаточно высокой устойчивостью к кратковременному действию СПАВ, несмотря на усиление прооксидантных процессов и снижение содержания низкомолекулярных антиоксидантов (каротиноидов и фенольных соединений). Комплекс зеленых пигментов этого адвентивного вида (Хл a и b) продемонстрировал высокую устойчивость при краткосрочном инкубировании в среде с повышенными концентрациями СПАВ. По-видимому, реализация адаптивных компенсаторных механизмов у ряски горбатой позволяет этому виду успешно натурализоваться в новых местообитаниях, подверженных значительной антропогенной нагрузке.

Литература

- Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика: учебник, 2-е изд. М.: Изд-во МГУ, Наука, 2004. 656 с.
- Борисова Г.Г., Малева М.Г., Некрасова Г.Ф., Чукина Н.В. Методы оценки антиоксидантного статуса растений: учебно-методическое пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. 72 с.
- 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.

Волкова Г.А., Сторожук Н.Ю. Методы очистки сточных вод, содержащих синтетические поверхностно-активные вещества // Вестник Брестского государственного технического университета. 2012. № 2. С. 38–41.

Дюрягина А.Н., Сидоренко Ю.С., Островной К.А., Исмагамбетова Д.Н., Кондратов А.А. Особенности изменения объемно-поверхностных свойств растворов аминоксодержащего ПАВ в уайт-спирите // Химический журнал Казахстана. 2013. № 2. С. 25–30.

Капитонова О.А. Ряска горбатая (*Lemna gibba*, Lemnaceae) – чужеродный вид во флоре Западной Сибири // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии: сборник научных статей по материалам XVII международной научно-практической конференции (24–26 мая 2018 г., Барнаул). Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2018. С. 50–51.

Мурзин И.Р., Косицына А.А., Розенцвет О.А., Макурина О.Н. Особенности действия загрязнителей различной химической природы на содержание водорастворимых белков в тканях водного погруженного растения *Egeria densa* // Вестник Самарского государственного университета. 2010. № 78. С. 191–199.

Остроумов С.А. Влияние синтетических поверхностно-активных веществ на гидробиологические механизмы самоочищения водной среды // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 5. С. 546–555.

Прадедова Е.В., Ищеева О.Д., Салеев Р.К. Классификация системы антиоксидантной защиты как основа рациональной организации экспериментального исследования окислительного стресса у растений // Физиология растений. 2011. Т. 58. № 2. С. 177–185.

Стржалка К., Костецка-Гугала А., Латовски Д. Каротиноиды растений и стрессовое воздействие окружающей среды: роль модуляции физических свойств мембран каротиноидами // Физиология растений. 2003. Т. 50. № 2. С. 188–193.

Третьякова А.С. Особенности распределения чужеродных растений в естественных местообитаниях на урбанизированных территориях Свердловской области // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». 2016. № 1. С. 85–93.

Шереметьева А.И., Шумченко О.А. Обогащение СПАВ и биогенными элементами поверхностного микрослоя вод у берегов Гвинеи // Экология моря. 1990. Т. 35. С. 44–47.

Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic membranes // Methods in Enzymology. 1987. Vol. 148. P. 350–382.

Singleton V.L., Orthofer R., Lamuela-Raventos R.M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin–Ciocalteu reagent // Methods in Enzymology. 1999. Vol. 299. P. 152–178.