

ВЛИЯНИЕ СОЛЁНОСТИ ВОДЫ НА РОСТ И РАЗМНОЖЕНИЕ ВОДНОГО ГИАЦИНТА В УСЛОВИЯХ БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

Макеев И.С.¹, Горбунова С.Ю.², Коротаева М.И.¹

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23); igmakeyev@mail.ru

² Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского (АР Крым, г. Севастополь) (299011, Республика Крым, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2); svetlana_8423@mail.ru

В условиях лабораторного эксперимента изучено влияние 2 ‰, 4 ‰ и 6 ‰ растворов морской соли на рост и размножение накопительной культуры *Eichornia crassipes* (водный гиацинт) в условиях высокой стартовой биогенной нагрузки карбамида (1,0 г/л) и гидрофосфата калия (0,4 г/л). Выделены 4 фазы динамики биомассы. В начальный постстрессовый период 22 суток обнаружен стимулирующий эффект морской соли в 2 ‰ и 4 ‰ на рост. В последующие 10 суток наблюдались: угнетение, отмирание листьев и гибель растений в среде 4 ‰, 6 ‰. В период 32-45 суток в контроле и в среде 2 ‰ происходило восстановление культуры, при этом продукция и размножение были значимо выше в контроле. Период 46–55 суток характеризовался замедлением роста и размножения по причине истощения запаса биогенных элементов в среде. Динамика биомассы коррелирует с изменением активной реакции среды, отражающей увеличение скорости фотосинтеза.

Ключевые слова: водный гиацинт, *Eichornia crassipes*, солёность, рост, размножение, биомасса, чистая продукция, стресс, биогенная нагрузка

THE INFLUENCE OF WATER SALINITY ON THE GROWTH AND REPRODUCTION OF WATER HYACINTH AT NUTRIENT LOAD

Makeyev I.S., Gorbunova S.Y., Korotaeva M.I.

¹ Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (603950, Nizhny Novgorod, Gagarin Ave, 23)

² Institute of biology of southern seas n.a. A.O. Kovalevsky (AR Crimea, Sevastopol) (299011, Republic of Crimea, Sevastopol, Nakhimov Ave, 2)

In laboratory experiments studied the effect of 2 ‰, 4 ‰ and 6 ‰ solutions of sea salt on the growth and reproduction of cumulative culture *Eichornia crassipes* (water hyacinth) in conditions of high initial nutrient loading of urea (1.0 g/l) and potassium hydrogen phosphate (0.4 g/l). Selected 4 phase dynamics of biomass. In the initial post-stress period of 22 days discovered the stimulating effect of sea salt for growth in 2 ‰ and 4 ‰. In the next 10 days were observed: depression, death of leaves and plants in the medium of 4 ‰, 6‰. During 32-45 day was a recovery culture in the control and 2‰, while the production and reproduction were significantly higher in the control. Period 46-55 day was characterized by slow growth and reproduction due to the exhaustion of the stock of nutrients in the environment. Dynamics of biomass correlates with pH variation reflecting the increase rate of photosynthesis.

Keywords: water hyacinth, *Eichornia crassipes*, salinity, growth, reproduction, biomass, net productivity, stress, nutrient load.

Водные макрофиты способны интенсивно поглощать и накапливать многие минеральные и органические вещества, входящие в состав промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод. Ассимиляционная способность гидрофитов широко используется для биоремедиации промышленно загрязненных вод [1-3, 6-10, 14].

В последнее время подробно исследованы процессы поглощения, ассимиляции и детоксикации водными макрофитами тяжелых металлов, фенолов, нефтепродуктов, СПАВ и др. [1, 2, 7-10, 12-14]. Однако исследованиям солеустойчивости и деминерализационной способности гидрофитов уделяется мало внимания [4, 5, 15]. Определение верхних порогов и

изучение адаптационных механизмов солеустойчивости гидрофитов является важной задачей в связи с оптимизацией подбора видов и конструирования биоплато для фиторемедиации природных и сточных вод в аридных зонах и при комбинированном загрязнении [5, 7].

Наиболее широкое применение в фиторемедиации комплексно загрязненных сточных вод и природных водоемов имеет водный гиацинт (*Eichornia crassipes*) – представитель семейства понтедериевых – южноамериканский интродуцент. Это многолетнее, плавающее в поверхностном слое воды розеточное растение (плейстонный гидрофит) – доминант небольших водоемов и водотоков тропической и субтропической зон.

Экологические особенности водного гиацинта следующие [3, 15–18]:

- светолюбивый;
- теплолюбивый (рост и размножение: +16-33°C, оптимум: +25-29°C, гибель: +4°C);
- размножение вегетативное с очень высокой скоростью (до 70 раметов в месяц);
- способность расти и размножаться в среде, содержащей высокие концентрации загрязняющих веществ, вызывающие гибель других водных растений;
- высокая скорость поглощения и биоаккумуляции токсикантов.

Установлен выраженный аллелопатический эффект сырого экстракта эйхорнии по отношению к зеленым водорослям *Chlorella vulgaris* и *Dictyochloropsis splendida* и к цианобактериям *Spirulina platensis*, *Nostoc piscinale*. Наибольшее подавление роста и размножения наблюдается у *Chlorella vulgaris* [17].

Имеются фрагментарные сведения о влиянии солёности воды на рост и размножение водного гиацинта [15, 16, 18]. Холм и др. отмечали, что водной гиацинт не выносит солоноватой воды [16]. Экспериментально определена обратная зависимость между продуктивностью *E. crassipes* и минерализацией воды [18]. При солёности выше 6 ‰ прекращается рост, образуются некротические пятна на листьях, а выше 8 ‰ – необратимые физиологические повреждения [15, 18].

Целью работы является изучение повышенной солёности воды (2 ‰, 4 ‰ и 6 ‰) в условиях стартовой азотной и фосфорной нагрузки на рост, развитие и размножение лабораторной культуры водного гиацинта.

Материал и методы исследования

Исследования накопительной культуры водного гиацинта проводили на базе отдела биотехнологий и фиторесурсов Института биологии южных морей (г. Севастополь) в условиях лабораторного эксперимента при круглосуточном освещении лампами DRLS в 4-х бассейнах объемом 100 л. В качестве питательной среды использовали водные вытяжки низинного торфа (10 кг торфа / 100 л воды). После загрузки торфа и заполнения бассейнов

пресной водой провели отстаивание в течение 3 суток. Объем водной среды составлял 50,0 л. На 3-и сутки к объему среды добавили навески морской соли для получения растворов 2 ‰, 4 ‰ и 6 ‰. Для контроля использовали пресную воду с минерализацией 0,5 ‰. Уровень воды в бассейне поддерживали, компенсируя испарение воды добавлением профильтрованной водопроводной воды.

В качестве имитации залповой эвтрофикации водоема произведено однократное внесение в бассейны по 50 г карбамида и 20 г K_2HPO_4 . В результате превышение ПДК по нормативам для рыбохозяйственных водоемов эвтрофного типа составило для мочевины – 12,5 раз, фосфатов – 2 раза [11]. Активная реакция среды – 9,0. Среду нейтрализовали добавлением 0,1 % раствора соляной кислоты под контролем буферного раствора соды.

Таблица 1

Условия проведения эксперимента*

№ эксперимент группы	1	2	3	4
Серия эксперимента	контроль	2 ‰	4 ‰	6 ‰
Температура воды, °С	26,0-31,0	26,0-30,0	26,0-29,0	26,0-31,0
	29,1±1,1	28,6±0,7	28,2±0,9	29,3±1,2
Активная реакция, лог.ед.	7,31-8,53	6,50-7,67	6,30-8,00	6,50-8,20
	7,98±0,35	7,00±0,30	7,00±0,42	7,52±0,37

* над чертой – пределы колебаний, под чертой – среднее и среднеквадратичное отклонение.

Продолжительность эксперимента – 55 суток (17.02-14.04.2014). Интенсивность освещения у листовой поверхности (3000 лк) контролировали с помощью люксметра Ю-116. Активную реакцию среды измеряли с помощью иономера И-160М.

Ежедневно в 11 ч. в бассейнах измеряли температур и рН воды. Температуру воды регулировали с помощью аквариумных обогревателей AQ-200W. Температуру воздуха поддерживали в пределах: 19–25 °С.

Биомассу определяли в начале эксперимента и, начиная с 22 суток, через каждые 3 дня. В течение первых 22 суток стресса растения не извлекали. Для взвешивания растения кратковременно подсушивали между двумя слоями фильтровальной бумаги. Измеряли морфометрические параметры (длину черешка и корней, длину и ширину листовой пластинки), количество раметов, проводили взвешивание каждого растения с помощью аналитических весов ВЛР-200 с пределами измерений 1 мг – 200 г по ГОСТ 24104-80. Затем растения возвращали в культивационные бассейны. Сырую биомассу пересчитывали на абсолютно сухое вещество (АСВ) по коэффициенту 0,088.

Результаты исследования и их обсуждение

В период стресса, вызванного избыточной биогенной нагрузкой, отмечалось развитие хлороза, некротических пятен и краевого усыхания листьев, а также отмирание части корней и их замещение новыми. Динамика биомассы имеет фазовый характер (рис. 1).

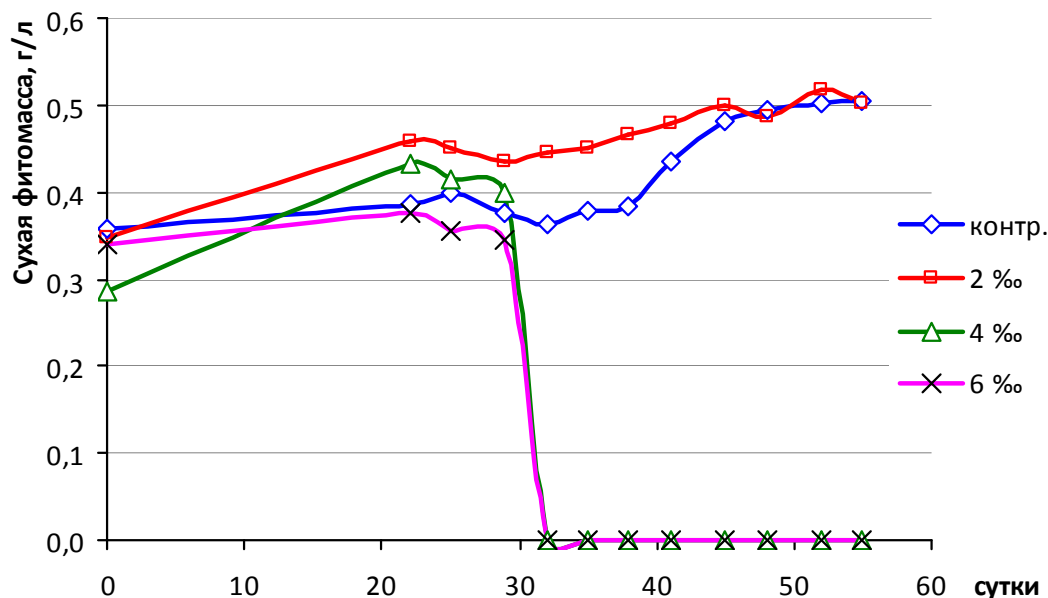


Рис. 1. Динамика биомассы (г/л сухого вещества) водного гиацинта в бассейнах с разной соленостью среды

В период первых 22 суток прирост биомассы отмечался при солености 2 ‰ и 4 ‰, продуктивность была сравнительно высокой за счет активного роста корней. В контроле и при солености 6 ‰ биомасса значительно не изменялась (табл. 2).

Таблица 2

Динамика биомассы (В, мг/л АСВ) и суточной продукции (P_n, мг/л сут. АСВ) при разной солености среды

Количество суток	контроль		2,0 ‰		4,0 ‰		6,0 ‰	
	В	P _n	В	P _n	В	P _n	В	P _n
0	357,3		348,5		286,9		339,7	
22	387,2	1,4	458,5	5,0	433,8	6,7	375,8	1,6
25	400,4	4,4	450,0	-2,8	413,6	-6,7	355,5	-6,7
29	374,9	-6,4	434,7	-3,8	398,6	-3,7	345,0	-2,6
32	364,1	-3,6	446,7	4,0	0,0	0	0,0	0
35	378,9	4,9	449,9	1,1	0,0	0	0,0	0
38	383,9	1,6	465,2	5,1	0,0	0	0,0	0
41	434,9	17,0	480,0	4,9	0,0	0	0,0	0
45	482,2	11,8	499,8	5,0	0,0	0	0,0	0
48	493,7	3,8	485,8	-4,7	0,0	0	0,0	0
52	503,0	2,3	518,7	8,2	0,0	0	0,0	0
55	505,1	0,7	501,8	-5,6	0,0	0	0,0	0

Период – 22–32 сутки был критическим, происходило отмирание поврежденных и медленный рост молодых листьев. В контроле и в среде 2 ‰ образовались 1 и 2 рамета (рис. 2). В опытах с 4 и 6 ‰ развития молодых листьев и размножения не произошло, растения

погибли. Прирост биомассы не компенсировал потери некромассы, поэтому в целом баланс был отрицательным и лишь в контроле – положительным (табл. 2).

Период прироста биомассы в результате формирования и развития молодых раметов начался с 33-х суток в контроле и с 30-х сут. в 2 ‰ среде и продолжался до 45 суток. Наибольшая удельная суточная продуктивность (P/B) – 4,4 % сут⁻¹ отмечалась в контроле в 38–41 сутки. При солености 2 ‰ наблюдался медленный рост. Высокая скорость размножения отмечалась в период 41–52 сутки в контроле (максимум: 48–52 сутки – 1,3 рамета/сут.), а в 2 ‰ среде она была значительно ниже (максимум: 45–48 сутки – 0,33 рамета/сут.). Различия по критерию Крускала-Уоллеса значимые (H=4,05, p=0,044).

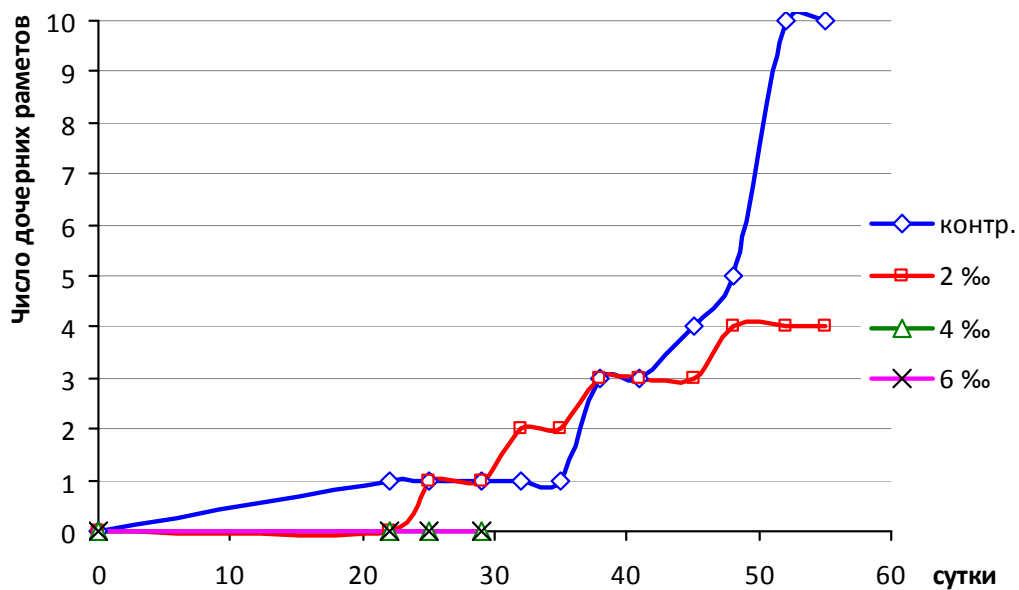


Рис. 2. Динамика образования раметов водного гиацинта в бассейнах с разной соленостью среды

В период – 45–55 сутки наряду с ростом и размножением началось усыхание поврежденных листьев, наиболее выраженное при 2 ‰ солености. В период – 52–55 сутки рост и размножение прекратились (рис. 2), что вызвано исчерпанием биогенных элементов в воде.

Множественное последовательное сравнение биомасс всех серий опыта с контрольной по критерию Крускала-Уоллеса показало статистически значимые различия по биомассе (K=31, p=0,0001) и скорости размножения (K=34, p=0,0001). Парное сравнение критерием Дана (p<0,05) выявило значимые различия по этим показателям между контролем и группами 4 ‰, 6 ‰, а также между группами 2 ‰ и 4 ‰; 2 ‰ и 6 ‰.

Корреляционный анализ динамики биомассы и суточной продукции критерием ранговой корреляции Спирмена показал следующее (табл. 3).

Ранговая корреляция биомассы и чистой продукции при разной солености

Корреляция Спирмена	Биомасса			Суточная продукция		
	2,0 ‰	4,0 ‰	6,0 ‰	2,0 ‰	4,0 ‰	6,0 ‰
контроль	0,951	-0,164	-0,164	0,230	0,214	0,214
2,0 ‰		-0,294	-0,294		0,518	0,518
4,0 ‰			1,000			1,000

Жирным шрифтом выделены значимые корреляции показателей ($P < 0,05$).

Наибольшую согласованность ($r=1,00$; $p=0,0001$) имеет динамика биомассы и суточной продукции при солености 4 и 6 ‰. Высокая корреляция ($r=0,95$ $p=0,0001$) отмечена по биомассе в контроле и в среде 2 ‰. Однако в этой группе сравнения суточная продукция значимо не коррелирована ($r=0,23$ $p=0,485$), что объясняется различием в периодах размножения и отмирания старых листьев.

Динамика биомассы коррелирует с изменением pH среды: $r=0,81$, $p=0,002$ (контроль) и $r=0,97$, $p=0,0001$ (2 ‰ раствор). Активный рост и увеличение биомассы гиацинта вызывают смещение pH среды в щелочную сторону, что мы наблюдаем в ходе эксперимента (рис. 3).

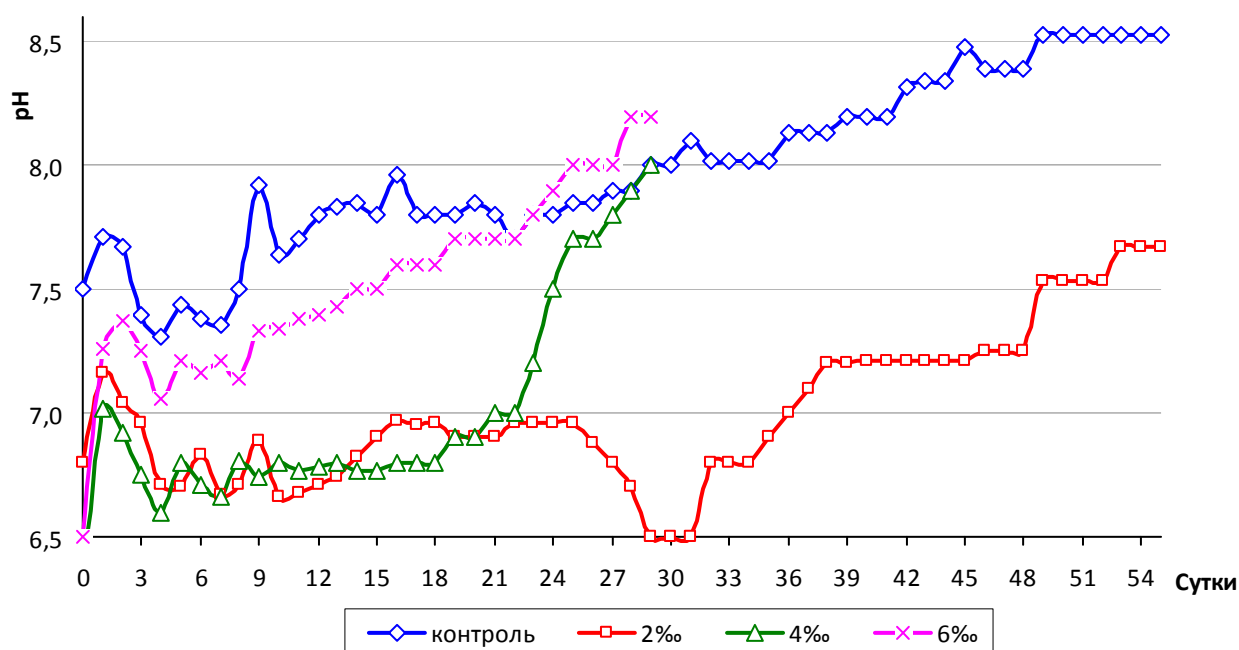


Рис. 3. Динамика pH в культивационных бассейнах с разной соленостью среды

Выводы

1. Изменения биомассы в контроле и опытной серии солености среды имеют фазовый характер. В начальный период отмечается прирост биомассы, наиболее выраженный при солености 2 ‰ и 4 ‰, с последующим угнетением и гибелью на 32-е сутки растений в среде 4 ‰, 6 ‰ и восстановлением культуры в 2 ‰ среде и пресной воде (контроль).

2. Активное вегетативное размножение отмечается в контроле в период 41–52 сутки (максимум: 1,3 рамет/сут.). При солености 0,2 ‰ скорость размножения значительно меньше (максимум: 0,33 рамет/сут.).

3. Динамика биомассы коррелирует с изменением активной реакции среды, отражающей увеличение скорость фотосинтеза.

4. Критической соленостью для водного гиацинта в условиях высокой стартовой биогенной нагрузки является 2 ‰.

Список литературы

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. Борисова Г.Г., Чукина Н.В., Малева М.Г. Адаптивный потенциал высших водных растений с разной аккумулятивной способностью // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2013. — № 3. — С. 104-114.
3. Горбунова С. Ю. Использование водного гиацинта *Eichornia crassipes* для биологической доочистки сточных вод // Экология моря. — 2009. — Вып. 78. — С.40-43.
4. Жутов А.С., Рогачева С.М., Губина Т.И. Использование макрофитов для деминерализации искусственных водоемов // Проблемы региональной экологии. — 2008. — № 4. — С. 99-101.
5. Жутов А.С., Рогачева С.М., Губина Т.И. Исследование возможности обессоливания водоема-охладителя Балаковской АЭС с помощью высших водных растений // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2010. — Т. 12. — № 1 (8). — С. 2125-2128.
6. Калайда М. Л. Доочистка производственных сточных вод с помощью высших водных растений // Экология и промышленность России. — 2010. — № 3. — С.33-35.
7. Крот Ю.Г. Использование высших водных растений в биотехнологиях очистки поверхностных и сточных вод // Гидробиол. журнал. — 2006. — Т. 42. — № 1. — С. 47-58.
8. Куок Ч.Х., Мельник И.В. Водные макрофиты как биосорбенты для удаления ионов тяжелых металлов из воды // Вода: химия и экология. — 2012. — № 12 (54).— С. 130-134.
9. Минаева О.М., Акимова Е.Е., Минаев К.М., Семенов С.Ю., Писарчук А.Д. Поглощение ряда тяжелых металлов из водных растворов растениями водного гиацинта (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) // Вестник Томского гос. ун-та. Серия: Биология. — 2009. — № 4. — С. 106-111.
10. Остроумов С.А., Соломонова Е.А. Инновационная разработка экотехнологического подхода к очищению вод: фиторемедиация с использованием водных макрофитов // Вода: технология и экология. — 2008. — № 3. — С. 48-56.

11. Перечень рыбохозяйственных нормативов: предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. Приказ государственного комитета РФ по рыболовству № 96 от 28 апреля 1999 г. – 188 с.
12. Соломонова Е.А., Остроумов С.А. Оценка допустимых нагрузок загрязняющих веществ на макрофиты в водной среде с использованием метода рекуррентных добавок // Водное хозяйство России — 2014 — № 2. — С. 88-101.
13. 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.
14. Agunbiade F.O., Olu-Owolabi B.I., Adebowale K.O. Phytoremediation potential of *Eichhornia crassipes* in metal-contaminated coastal water // Bioresource Technology. — 2009. — Vol. 100, № 19. — P. 4521-4526.
15. de Casabianca M.-L., Laugier T. *Eichhornia crassipes* production on petroliferous wastewaters: Effects of salinity // Bioresource Technology. — 1995. — Vol. —54. P.39-43.
16. Holm L.G., Plucknett DL, Pancho J.V., Herberger JP. The world's worst weeds: Distribution and biology. Honolulu: University Press of Hawaii. 1977. 609 pp.
17. Shanab Sanaa M. M., Shalaby Emad A., Lightfoot David A., El-Shemy Hany A., Allelopathic Effects of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) // PLOS One. 2010 Oct 8; 5(10). doi: 10.1371/journal.pone.0013200.
18. Биология и экология водного гиацинта: обзор иностранных источников информации на сайте Морской биологической исследовательской станции Смитсона, Форт Пирс, США. URL: http://www.sms.si.edu/irlspec/eichhornia_crassipes.html (дата обращения: 18.12.2014).

Рецензенты:

Дмитриев А. И., д.б.н., профессор, заведующий кафедрой биологии, химии и биолого-химического образования ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина», г. Нижний Новгород;

Воскресенская О. Л., д.б.н., профессор, директор института биологии и естественных наук и заведующая кафедрой экологии ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет», г. Йошкар-Ола.