

# ПОТЕНЦИАЛ ВОДНЫХ РАСТЕНИЙ КАК ФАКТОРОВ СНИЖЕНИЯ ИЗМЕРЯЕМОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЦИНКА И ДРУГИХ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

С.А. Остроумов, Т.В. Шестакова, С.В. Котелевцев, В.А. Поклонов,  
Е.А. Соломонова, Е.Г. Головня

МГУ им. М.В. Ломоносова, биологический и геологический факультеты,  
Москва

Изучали изменения концентраций тяжелых металлов в воде экспериментальных систем (микрокосмов) с макрофитами. Концентрации тяжелых металлов Zn, Cu, Cd, Pb в воде экспериментальных микрокосмов измеряли методом инверсионной вольтамперометрии. В микрокосмах инкубировали макрофиты *Ceratophyllum demersum*. Концентрация цинка после инкубации с макрофитами уменьшилась на порядок. Измеряемые этим методом концентрации металлов в микрокосмах с макрофитами снижались значительно быстрее, чем в контрольных микрокосмах без растений.

*Ключевые слова:* качество воды, химическое загрязнение, Zn, Cu, Cd, Pb, тяжелые металлы, фиторемедиация, инверсионная вольтамперометрия, микрокосмы, водные макрофиты.

Dynamics of the concentrations of heavy metals in the water of experimental systems (microcosms) with macrophytes was studied. Using the method of inversion voltamperometry, the concentrations of the heavy metals Zn, Cu, Cd, Pb were measured in the water of the experimental microcosms. Aquatic macrophytes *Ceratophyllum demersum* were incubated in the microcosms. The concentration of Zn decreased by one order of magnitude. The measured concentrations of all four heavy metals decreased in the microcosms with the macrophytes much faster than in the control microcosms without any aquatic plants.

*Keywords:* water quality, chemical pollution, Zn, Cu, Cd, Pb, heavy metals, phytoremediation, inversion voltamperometry, microcosms, aquatic macrophytes.

Для снижения опасности химического загрязнения среды и ремедиации загрязненных сред с использованием экотехнологий существенно то, что организмы способны воздействовать на физические и химические параметры окружающей среды [1, 2], в том числе на параметры водной среды [3, 4].

В водных экосистемах имеют место сложные взаимосвязи между биотой и качеством воды, функционируют комплексные механизмы самоочищения воды, в которых существенная роль принадлежит биоте [5–12], в том числе макрофитам. Макрофиты исследуются с перспективой разработки экотехнологий очищения компонентов окружающей среды (фиторемедиации) [13–17]. В предыдущих работах изучали роль макрофитов нескольких видов как потенциальных компонентов очищения водной среды, загрязненной перхлоратом [16] и синтетическим поверхностно-активным веществом (ПАВ) додецилсульфатом натрия [13, 15, 17].

Для получения более полной картины необходимо изучать системы и с другими загрязняющими веществами, в том числе с такими приоритетными поллютантами, как тяжелые металлы. Многие тяжелые металлы оказывают разнообразные негативные эффекты на организмы, в том числе проявляют мембранотропное действие.

Цель исследования, о результатах которого сообщается в этой статье, – изучить динамику концентраций металлов (Zn, Cu, Cd, Pb) в водной среде микрокосмов, содержащих водное растение (макрофит) *Ceratophyllum demersum* L. (семейство роголистниковые – Ceratophyllaceae).

## Методы

Опыты ставили в условиях микрокосмов, ранее успешно использованных в предыдущих экспериментах [13, 17]. Для приготовления вод-

ной среды в микрокосмах использовали водопроводную воду, отстоенную в течение недели (отстоенную водопроводную воду, ОВВ). В качестве исходных водных растворов ионов металлов использовали ГСО (государственные стандартные образцы) с массовой концентрацией 1 мг/см<sup>3</sup> при температуре 20°C. Были использованы следующие ГСО: Zn ГСО 7770-2000 в 1 М соляной кислоте, Pb ГСО 7778-2000 в 1 М азотной кислоте, Cd ГСО 7773-2000 в 1 М азотной кислоте, Cu ГСО 7764-2000 в 0,5 М серной кислоте. С использованием последовательных разбавлений и определенных аликвот был получен раствор, содержащий в 1 л: по 2 мг Zn и Cu; 0,1 мг Pb; 0,02 мг Cd. По всем этим элементам имело место превышение ПДК для вод водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Fe (0,1 мг/л) был внесен в качестве компонента минерального питания растений. Для внесения Fe использовали ГСО 1 мг/см<sup>3</sup> в 1 М HCl. Концентрации в полученном растворе макрокомпонентов (анионов) соответствовали допустимому уровню и составляли 73 мг/л хлор-иона, 96 мг/л сульфат-иона и 12 мг/л нитрат-иона. pH полученного раствора солей металлов составил 6,0. При инкубации в этом растворе макрофитов pH повысился.

Макрофиты *Ceratophyllum demersum* были собраны в пресноводном водоеме (пруду) в пойме р. Москвы в Одинцовском районе (Московская область) на относительно благополучной в экологическом отношении территории, в отсутствии загрязнения воды промышленными сточными водами. Затем макрофиты были перенесены в лабораторные сосуды и несколько раз промывались водой (ОВВ) для удаления загрязняющих взвесей и снижения возможной загрязненности их поверхности.

В микрокосмы № 1 и 2 с раствором металлов (одновременно присутствовали Zn, Cu, Cd, Pb) вносили побеги макрофитов *Ceratophyllum demersum*. Вес внесенной биомассы макрофитов указан в табл. 1. Объем раствора в каждом сосуде составлял 500 мл.

В качестве контроля служили сосуды № 3 и 4 с таким же раствором металлов без макрофитов. Сверх того, для дополнительного контроля сохранения жизнеспособности макрофитов в чистой воде одновременно с экспериментальными микрокосмами были поставлены дополнительные сосуды, где инкубировались макрофиты в ОВВ без добавления металлов.

Инкубирование микрокосмов проводили в условиях естественной фотопериодичности и комнатной температуры. Через 3 дня во всех микрокосмах и в контрольных сосудах (раствор солей без макрофитов) pH был 7,3.

Из воды микрокосмов и контрольных инкубационных сосудов отбирали образцы для проведения химического анализа. Определение массовых концентраций ионов металлов в растворе проводилось методом инверсионной вольтамперометрии. Анализ проводили на инверсионном вольтамперометрическом анализаторе АКВ-07МК (ООО Аквилон, РФ) с трехэлектродной системой, представленной следующими электродами: 1) вращающийся углесталовый измерительный электрод; 2) хлорсеребряный электрод сравнения, заполненный насыщенным раствором KCl; 3) третьим электродом служил стеклоуглеродный тигель, в котором происходил электролиз.

Управление процедурой детектирования и определения концентраций металлов, а также обработку данных осуществляли с помощью компьютера с использованием программы

**Таблица 1.** Фитомасса растений *Ceratophyllum demersum*, внесенных в экспериментальные микрокосмы

Номер варианта	Номер маркировки сосуда	Наличие растений	Биомасса макрофитов (сырой вес), г
1 (одновременно присутствовали металлы Zn, Cu, Cd, Pb)	1	есть	12,7
	2	есть	17,8
2 (контроль, без внесения металлов)	3	нет	–
	4	нет	–

«Polar-3». Метод основан на электрохимическом концентрировании цинка, меди, свинца и кадмия на поверхности измерительного углесталового электрода в виде амальгамы Hg и последующем электрохимическом растворении при заданном потенциале с регистрацией вольтамперограммы. Определение массовых концентраций металлов производили методом добавок. Измерение цинка, кадмия и свинца проводили в среде ацетатно-аммонийного буфера (pH = 4,8) с добавлением триэтаноламина. Медь определяли на фоне 1 М соляной кислоты.

Использованный метод инверсионной вольтамперометрии обладает рядом полезных особенностей. К достоинствам определения металлов с помощью метода инверсионной вольтамперометрии относятся высокая чувствительность ( $10^{-8}$ – $10^{-10}$  моль/л), удовлетворительная избирательность и разрешающая способность, хорошая воспроизводимость, экспрессность, а

также относительная простота пробоподготовки (во многих случаях не требуется концентрирование и отделение мешающих анализу веществ) [18].

### Результаты и их обсуждение

Динамика состояния макрофитов *Ceratophyllum demersum* в микрокосмах охарактеризована в табл. 2. Отметим, что через несколько дней инкубации в микрокосмах с добавленными тяжелыми металлами начали проявляться признаки неблагополучия. Часть листьев отделялись от побегов и опускались в нижнюю часть сосудов (табл. 2). Происходила частичная фрагментация стеблей растений. Признаки неблагополучия были ярко выражены через 7 дней инкубации.

Динамика концентраций металлов в водной среде микрокосмов приведена в табл. 3.

**Таблица 2.** Наблюдаемое в микрокосмах состояние растений *Ceratophyllum demersum* в условиях инкубации в водной среде с тяжелыми металлами (Zn, Cu, Cd, Pb)

Дата наблюдения	Длительность инкубации, сут	Состояние	Комментарии
17.10.08	0 (начало опыта)	Макрофиты живы	Начало инкубации в опыте
24.10.08	7	Признаки неблагополучия	Часть листьев отделилась от стеблей. На некоторых побегах растений наблюдалась слизистая пленка
27.10.08	10	Явные признаки неблагополучия; побеги погибли или на грани гибели	Листья отделились от стеблей. Частичная фрагментация стеблей. На поверхности воды заметна слизистая пленка. Биомасса растений опустилась в нижнюю часть столба воды; верхняя часть столба воды, свободная от растений, составляла 1–2 см
5.11.08	19	Растения погибли	То же; верхняя часть столба воды, свободная от растений, составляла 1–2 см
14.11.08	28	То же	То же; поскольку биомасса растений опустилась вниз, то верхняя часть столба воды, свободная от растений, составляла 3–4 см; в сосуде 1 цвет побегов погибших макрофитов – зеленоватый; в сосуде 2 – разрушение мертвых фрагментов растений микроорганизмами (затхлый запах), вода мутная

**Таблица 3.** Концентрации тяжелых металлов (Zn, Cu, Cd, Pb) в водной среде микрокосмов (мг/л)

Характеризуемая водная среда	Элементы	Микрокосм 1 (с макрофитами)	Микрокосм 2 (с макрофитами)	Микрокосм 3 (контроль без макрофитов)	Микрокосм 4 (контроль без макрофитов)
Водная среда для инкубации макрофитов с добавками металлов, номинальные концентрации, до 17.10.08	Zn	2	2	2	2
	Cu	2	2	2	2
	Cd	0,02	0,02	0,02	0,02
	Pb	0,1	0,1	0,1	0,1
Та же водная среда, измерено перед опытом до внесения макрофитов 17.10.08	Zn	1,8	1,8	1,8	1,8
	Cu	2,0	2,0	2,0	2,0
	Cd	0,04	0,04	0,04	0,04
	Pb	0,09	0,09	0,09	0,09
20.10.08	Zn	1,5	1,4	1,8	1,9
	Cu	0,3	0,3	1,3	1,6
	Cd	0,01	0,01	0,03	0,02
	Pb	0,001	0,003	0,03	0,02
23.10.08	Zn	0,43	0,49	1,8	1,8
	Cu	0,3	0,3	1,3	1,5
	Cd	0,005	0,005	0,03	0,03
	Pb	0,003	0,003	0,02	0,02
27.10.08	Zn	0,2	0,2	0,9	1,1
	Cu	0,14	0,12	1,00	0,95
	Cd	0,002	0,003	0,010	0,009
	Pb	0,002	0,002	0,018	0,016
5.11.08	Zn	0,2	0,2	0,9	1,0
	Cu	0,066	0,053	1,20	1,12
	Cd	0,003	0,002	0,008	0,011
	Pb	<0,001	<0,001	0,016	0,012

Концентрации металлов, созданные в воде микрокосмов в начале инкубации, были подобраны так, что они превышали величины ПДК и для питьевой воды, и для водоемов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (см. табл. 4 ниже). Таким образом, эти значения концентраций металлов явно выходили за пределы допустимого с точки зрения санитарно-гигиенической безопасности. В случае появления металлов в таких концентрациях в источниках водоснабжения безусловно возникает практическая необходимость в поисках средств для снижения их содержания в воде.

Результаты эксперимента (табл. 3) показали, что по всем металлам наблюдалось снижение концентраций в воде форм металлов, регистрируемых данным методом. По всем металлам снижение было весьма значительным. Снижение измеренной концентрации цинка произошло в 10 раз, меди – более чем в 30 раз, кадмия – в 7–10 раз, свинца – более чем в 100 раз (табл. 4). По цинку, меди и свинцу достигнуто снижение до уровня ниже ПДК в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. По кадмию произошло существенное снижение концентрации.

**Таблица 4.** Соотношение начальных (номинальных) концентраций металлов, конечных концентраций в конце опыта и значений ПДК

Элемент	Внесено, мг/л	ПДК (питьевой воды), мг/л	ПДК водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, мг/л	Измерено в конце инкубации, мг/л
Zn	2	0,01	1	0,2
Cu	2	0,01	1	0,053–0,066
Cd	0,02	–	0,001	0,002–0,003
Pb	0,1	–	0,03	<0,001

Исходная концентрация кадмия превышала ПДК в 20 раз, а в конце опыта – в среднем лишь в 2,5 раза (табл. 4).

Наблюдения микрокосмов показали, что водные растения *Ceratophyllum demersum* погибли после инкубации в течение менее 18 дней. Четкие признаки неблагополучия состояния растений были отмечены после инкубации в течение 7 дней (табл. 2). В дополнительных контрольных микрокосмах, где макрофиты *Ceratophyllum demersum* инкубировались в ОВВ без добавления металлов, признаков неблагополучия или гибели растений не наблюдали в течение всего опыта.

Интересно сопоставить динамику снижения концентраций металлов, выявляемых в воде, и динамику состояния растений *Ceratophyllum demersum*. Начальное снижение концентрации металлов выявлено в течение периода жизнеспособности растений. Однако и после наступления явного неблагополучия в состоянии растений (отделение листовых пластинок от стеблей; частичная фрагментация побегов) выявляемые концентрации металлов в воде продолжали снижаться. Макрофиты выступили действенным фактором снижения выявляемых концентраций металлов в воде даже после своей гибели.

Известно, что металлы находятся в воде во многих формах [18]. Использованный метод (анодная инверсионная вольтамперометрия, АИВ) выявляет так называемые «свободные» ионы металлов и комплексы, способные диссоциировать в диффузионном слое вблизи поверхности электрода [18]. Для увеличения полноты детектирования комплексов Zn и Pb измерения проводили в среде ацетатно-аммонийного буфера, а для нейтрализации мешающего влияния железа добавляли триэтанолламин. Уменьшение концентрации металлов со временем в

контрольных сосудах, возможно, связано с сорбцией их стенками сосудов при pH = 7. Сравнение динамики показало значимое влияние макрофитов *Ceratophyllum demersum* на снижение концентраций металлов в растворе, выявляемых методом АИВ.

Общий итог проведенных опытов согласуется с предположением, что в присутствии макрофитов *Ceratophyllum demersum* может ускоряться снижение концентрации в воде поллютантов (металлов Zn, Cu, Cd, Pb). Для уточнения характера влияния макрофитов в дальнейшем целесообразно провести дополнительные анализы с использованием других методов детектирования металлов.

Описанная в этой статье работа продолжает ранее проведенные исследования, в которых изучали фиторемедиационный потенциал и чувствительность к поллютантам других видов макрофитов, а именно: *Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verdc. (семейство сланоягодниковые или урутевые – Haloragaceae) [16], *Elodea canadensis* Mchk. (семейство водокрасовые – Hydrocharitaceae), *Potamogeton crispus* L. (семейство рдестовые – Potamogetonaceae), *Najas guadelupensis* L. (семейство наядовые – Najadaceae), *Fontinalis antipyretica* L. (семейство родниковые – Fontinalaceae), *Salvinia natans* L., *Salvinia auriculata* Aubl. (семейство сальвиниевые – Salviniaceae) [17]. Выявленные факты вносят вклад в расширение знаний о роли макрофитов в комплексных биотических механизмах самоочищения воды и формирования ее качества в водоемах и водотоках [4–8, 10–12, 19–22].

Полученные результаты согласуются с данными литературы о взаимодействии металлов с макрофитами [23–30], включая данные о негативном воздействии ряда тяжелых металлов на макрофиты [23–25] и сведения о способности

**Таблица 5.** Изучение взаимодействия тяжелых металлов с водными макрофитами (примеры)

Металлы	Макрофиты	Комментарии	Ссылки
Cd 10 мкМ	<i>Ceratophyllum demersum</i> L.	Cd вызывал сильный окислительный стресс, который проявлялся в высоком уровне перекисного окисления липидов и активности липоксигеназы (LOX, E.C. 1.13.11.12)	[23]
Zn 10, 50, 100, 200 мкМ	<i>Ceratophyllum demersum</i> L.	Растения, на которые действовали высокой концентрацией Zn, не поглощали его в больших количествах и не проявляли высокой активности антиоксидантных ферментов	
Zn, Cd	<i>Ceratophyllum demersum</i> L.	Выявлена резко повышенная активность антиоксидантных ферментов супероксид дисмутаза (SOD, E.C. 1.15.1.1), каталазы (CAT, E.C. 1.11.1.6), аскорбатпероксидазы (APX, E.C. 1.11.1.11) и гвайяколпероксидазы (GPX, E.C. 1.11.1.7). Это повышение было более ярко выражено, чем повышение активности в тех растениях, на которые подействовал один металл – Cd или Zn	
Zn, Cd	<i>Ceratophyllum demersum</i> L.	Кадмий нарушал активность фермента карбоангидразы. Цинк восстанавливал активность карбоангидразы, нарушенную кадмием	[24]
Hg	<i>Hydrilla verticillata</i> Presl, <i>Pistia stratiotes</i> L., <i>Salvinia molesta</i> D.S. Mitchell	Hg (концентрации до 1 мг/л, длительность воздействия 1–5 ч) вызывала повреждения листьев, воздействовала на содержание хлорофилла и вес фитомассы	[25]
Cu(II), Zn(II), Pb(II)	<i>Ceratophyllum demersum</i>	Максимальная адсорбция на <i>C. demersum</i> составляла 6,17 мг/г для Cu(II), 13,98 мг/г для Zn(II) и 44,8 мг/г для Pb(II)	[26]
Cu, Pb, Cd, Zn	<i>Typha latifolia</i> , <i>Carex</i> sp., <i>Ceratophyllum demersum</i>	Накопление металлов в макрофитах в концентрациях на 2–3 порядка более высоких, чем фоновые концентрации (в сильно загрязненных водоемах)	[27]
Cd, Pb, Cu, Zn, Mn	<i>Potamogeton pectinatus</i> L., <i>Potamogeton malaiianus</i> Miq.	Максимальные концентрации Cd, Pb, Cu, Zn и Mn найдены в листьях <i>P. pectinatus</i> и составили 596, 318, 62,4, 6590 и 16000 мг/кг (сухого веса), соответственно	[28]
Pb	<i>Iris lacteal</i> var. <i>chinensis</i>	Концентрации Pb в побегах и корнях <i>I. lacteal</i> var. <i>chinensis</i> (экспонированных при 4 мМ Pb) достигли 1,109 мкг/г и 2,408 мкг/г сухого веса, соответственно. Pb вносили как Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , инкубация 28 дней	[29]
Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se	<i>Lemna minor</i> L.	Максимальные выявленные концентрации элементов в ряске (в пересчете на 1 кг): 13,3 г Cd, 4,27 г Se, 3,36 г Cu, 2,87 г Cr, 1,79 г Ni, 0,63 г Pb. В экспериментальных условиях ряска проявила себя как хороший накопитель Cd, Se и Cu, умеренный накопитель Cr и относительно слабый накопитель Ni и Pb	[30]

макрофитов сорбировать существенные количества металлов [26–30] (табл. 5).

Подытоживая, можно отметить, что полученные выше результаты проведенных опытов подтверждают и расширяют сведения о фито-

ремедиационном потенциале водных макрофитов, который может быть использован на практике для разработки новых экотехнологий с целью снижения опасности комплексного загрязнения водной среды [31].

### Список литературы

- Добровольский, Г.В. О развитии некоторых концепций учения о биосфере (к 80-летию выхода в свет книги В.И. Вернадского «Биосфера») // Вода: технол. и экол. – 2007. – № 1. – С. 63–68.
- Добровольский, Г.В. К 80-летию выхода в свет книги В.И. Вернадского «Биосфера». Развитие некоторых важных разделов учения о биосфере // Экол. химия. – 2007. – Т. 16, № 3. – С. 135–143.
- Kapitsa, A.P. Formulation of fundamental principles for foundation of the theory of the apparatus of the biosphere // Environ. Ecol. and Safety Life Act. – 2007. – No. 1 (37). – P. 68–71.
- Абакумов, В.А. Инновационные подходы к восстановлению и ремедиации загрязненных водных объектов // Вода: технол. и экол. – 2007. – № 4. – С. 69–73.
- Остроумов, С.А. О биотическом самоочищении водных экосистем. Элементы теории // Докл. АН. – 2004. – Т. 396, № 1. – С. 136–141.
- Ostroumov, S.A. On the biotic self-purification of aquatic ecosystems: elements of the theory // Dokl. Biol. Sci. – 2004. – Vol. 396. – P. 206–211.
- Остроумов, С.А. Роль биотических факторов в формировании качества воды и самоочищении водных экосистем // Экол. химия. – 2004. – Т. 13, № 3. – С. 186–194.
- Ostroumov, S.A. Biological filtering and ecological machinery for self-purification and bioremediation in aquatic ecosystems: towards a holistic view // Riv. biol. / Biol. Forum. – 1998. – Vol. 91, No. 2. – P. 221–232.
- Ostroumov, S.A. Biological Effects of Surfactants. – Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis, 2006. – 279 p.
- Ostroumov, S.A. Inhibitory analysis of top-down control: new keys to studying eutrophication, algal blooms, and water self-purification // Hydrobiologia. – 2002. – Vol. 469. – P. 117–129.
- Ostroumov, S.A. Polyfunctional role of biodiversity in processes leading to water purification: current conceptualizations and concluding remarks // Hydrobiologia. – 2002. – Vol. 469. – P. 203–204.
- Ostroumov, S.A. Aquatic ecosystem as a bioreactor: water purification and some other functions // Riv. biol. / Biol. Forum. – 2004. – Vol. 97. – P. 39–50.
- Соломонова, Е.А., Остроумов, С.А. Изучение устойчивости водного макрофита *Potamogeton crispus* L. к додецилсульфату натрия // Вестн. МГУ. Сер. 16. Биология. – 2007. – № 4. – С. 39–42.
- Solomonova, E.A., Ostroumov, S.A. Tolerance of an aquatic macrophyte *Potamogeton crispus* L. to sodium dodecyl sulphate. – Moscow Univ. Biol. Sci. Bull. – 2007. – Vol. 62, No. 4. – P. 176–179.
- Лазарева, Е.В., Остроумов, С.А. Ускорение снижения концентрации поверхностно-активного вещества в воде микроскопа в присутствии растений // Докл. РАН. – 2009 (принято в печать).
- Ostroumov, S.A., Yifru D., Nzengung V., McCutcheon S. Phytoremediation of perchlorate using the aquatic plant *Myriophyllum aquaticum* // Ecol. Stud., Hazards, Solut. – 2006. – Vol. 11. – P. 25–27.
- Соломонова, Е.А., Остроумов, С.А. Биоэффекты воздействия додецилсульфата натрия на водные макрофиты // Вод. х-во России. – 2006. – № 6. – С. 32–39.
- Линник, Р.П., Линник, П.Н., Запорожец, О.А. Методы исследования сосуществующих форм металлов в природных водах (обзор) // Методы и объекты хим. анал. – 2006. – Т. 1, № 1. – С. 4–26.
- Остроумов, С.А. О некоторых вопросах поддержания качества воды и ее самоочищения // Вод. ресурсы. – 2005. – Т. 32, № 3. – С. 337–347.
- Ostroumov, S.A. On some issues of maintaining water quality and self-purification // Water Resour. – 2005. – Vol. 32, No. 3. – P. 305–313.
- Остроумов, С.А. О полифункциональной роли биоты в самоочищении водных экосистем // Экология. – 2005. – № 6. – С. 452–459.
- Ostroumov, S.A. On the Multifunctional Role of the Biota in the Self-Purification of Aquatic Ecosystems // Russ. J. Ecol. – 2005. – Vol. 36, No. 6. – P. 414–420.
- Aravind, P., Prasad, M.N.V. Zinc alleviates cadmium-induced oxidative stress in *Ceratophyllum demersum* L.: a free floating freshwater macrophyte // Plant Physiol. and Biochem. – 2003. – Vol. 41, No. 4. – P. 391–397.
- Aravind, P., Prasad, M.N.V. Carbonic anhydrase impairment in cadmium-treated *Ceratophyllum demersum* L. (free floating freshwater macrophyte): toxicity reversal by zinc // J. Anal. Atom. Spectrom. – 2004. – Vol. 19. – P. 52–57.
- Mhatre, G.N., Chaphekar, S.B. The effect of mercury on some aquatic plants // Environ. Pollut. Series A. Ecol. and Biol. – 1985. – Vol. 39, No. 3. – P. 207–216.
- Keskinkan, O., Goksu, M.Z.L., Basibuyuk, M., Forster, C.F. Heavy metal adsorption properties of a submerged aquatic plant (*Ceratophyllum demersum*) // Bioresour. Technol. – 2004. – Vol. 92, No. 2. – P. 197–200.
- Hozhina, E.I., Kolmogorov, Y.P., Bessonov, D.Y. The heavy metals in the macrophytes of the mining tailing impoundments // Miner. Mag. – 1998. – Vol. 62A, No. 2. – P. 659–660.
- Penga, K., Luoc, C., Loua, L., Lic, X., Shena, Z. Bioaccumulation of heavy metals by the aquatic plants *Potamogeton pectinatus* L. and *Potamogeton malaianus* Miq. and their potential use for contamination indicators and in wastewater treatment // Sci. Total Environ. – 2008. – Vol. 392, No. 1. – P. 22–29.
- Han, Y., Huang, S., Gu, J., Qiu, S., Chen, J. Tolerance and accumulation of lead by species of *Iris* L. // Ecotoxicology. – 2008. – Vol. 17, No. 8. – P. 853–859.
- Zayed, A., Gowthaman, S., Terry, N. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants. I. Duckweed // J. Environ. Qual. – 1998. – Vol. 27, No. 3. – P. 715–721.
- Остроумов, С.А. Подходы к очищению и оздоровлению водных объектов (фиторемедиация, биоремедиация, зооремедиация) в связи с теорией полифункциональной роли биоты в самоочищении вод // Вода: технол. и экол. – 2007. – № 2. – С. 49–69.