

РОЛЬ БИОГЕННОГО ДЕТРИТА ВОДНЫХ СИСТЕМ В АККУМУЛЯЦИИ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ НА ПРИМЕРЕ ВОСЬМИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЫШЬЯКА

© 2010 г. С.А. Остроумов¹, Л.Л. Демина²

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

² Институт океанологии им. П.П. Ширинова Российской академии наук, Москва

Ключевые слова: водные экосистемы, качество воды, загрязнение поверхностных вод тяжелыми металлами, самоочищение воды, биогенный детрит, роль детрита в накоплении элементов, микрокосмы, биота, моллюски, макрофиты, тяжелые металлы, As, Co, Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Cr, Pb, *Viviparus viviparus*, *Ceratophyllum demersum*, атомно-абсорбционная спектрометрия.

Изучена роль детрита в накоплении элементов, в том числе тяжелых металлов, в условиях контролируемых экспериментальных систем. Детрит, образовавшийся за 8 месяцев в микрокосмах с *Viviparus viviparus* и *Ceratophyllum demersum*, содержал As и тяжелые металлы. Их концентрации в детрите, определенные методом атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС), располагались в следующем убывающем порядке (от более высоких концентраций к меньшим): Fe > Mn > Zn > Cu > Pb > As > Co > Cd > Cr. Если в экспериментальный микрокосм добавляли смесь нескольких тяжелых металлов, то эти металлы (Fe, Mn, Zn, Cu, Co, Cd, Cr) в осадке биогенного детритного материала наблюдались в более высокой концентрации, чем в контроле. Наиболее заметное увеличение содержания металлов в детрите в микрокосмах с добавленными металлами произошло для Cd (превышение концентрации более чем в 3 раза по сравнению с контролем), Co (более чем в 13 раз) и Cr (более чем в 150 раз). Данные подтверждают предложенную теорию полифункциональной роли биоты в контроле качества воды и ее самоочищении.



С.А. Остроумов



Л.Л. Демина

Как показывают ежегодные государственные доклады о состоянии окружающей среды, химическое загрязнение водных объектов продолжает оставаться актуальной проблемой, представляющей серьезную опасность.

Мышьяк и тяжелые металлы относятся к поллютантам, влияющим на качество воды [1]. Установлены негативные воздействия тяжелых металлов на организмы, в том числе на активность ферментов [2]. Ряд тяжелых металлов оказывает мембранотропные эффекты. Доказаны вредные воздействия тяжелых металлов на здоровье человека, их способность повышать частоту злокачественных новообразований, болезней органов дыхания, кровообращения, нервной и эндокринной систем, нарушать иммунитет, репродуктивные функции женщин и мужчин, вызывать аллергию и задержки физического и психического развития (см. обзор в работе [3]).

Концентрации тяжелых металлов в воде в некоторых случаях превышают ПДК. Так, например, по приведенным в [3] данным 2004 г. выявлялась концентрация меди в р. Клязьма Московской области на уровне до 29 ПДК, р. Нева — до 43 ПДК. В отдельных случаях концентрации были еще выше: средние концентрации меди в р. Обь ниже г. Сургут достигали 324 ПДК, а максимальные — 1327 ПДК. Содержание цинка зарегистрировано на уровне 70 ПДК у Салехарда, 239 ПДК в р. Демьянка, 256 ПДК в р. Северная Сосьва бассейна Оби, 308 ПДК в р. Кидыш Челябинской области. Концентрация марганца выявлена на уровне 270 ПДК в р. Лобва (Свердловская область, 2003 г.), 520 ПДК — р. Кама, 547 ПДК — р. Кидыш Челябинской области. Содержание ртути в воде р. Алдан — до 80 ПДК.

Вопросы изучения судьбы тяжелых металлов, загрязняющих водные экосистемы, являются очень важными.

Исследовались водные организмы (моллюски) в связи с биогенной миграцией элементов в природе и экспериментальных микрокосмах [4—7]. Например, анализировали место моллюсков в миграции меди [5, 6] и кадмия [4]. Роль детрита в накоплении элементов, в том числе тяжелых металлов, в условиях контролируемых экспериментальных систем была изучена гораздо меньше.

Цель работы — сообщить об экспериментальном исследовании содержания ряда элементов в детрите, образуемом в лабораторных микрокосмах с моллюсками и макрофитами. Микрокосмы моделировали процесс образования биогенного детрита, который участвует в формировании донных седиментов в водных экосистемах — водоемах и водотоках.

Методы

Были сформированы микрокосмы в стеклянных сосудах, содержащих по 5 л отстоянной водопроводной воды, 6 моллюсков и макрофиты. Описание состава микрокосмов дано в табл. 1. Вес особей моллюсков в микрокосме № 1 варьировал от 4,7 до 6,7 г (сырой вес с раковинами); в микрокосме № 2 — от 4,1 до 6,7 г.

Для микрокосмов использовались моллюски *Viviparus viviparus*, которые были собраны в р. Москва выше г. Звенигород в относительно чистом районе, и макрофиты *Ceratophyllum demersum* из пруда на территории Москвы в пойме р. Москва. В сборе организмов участвовали Е.А. Соломонова и Ю.А. Моисеева.

Инкубация микрокосмов была начата в середине августа 2007 г. и проводилась при комнатной температуре в течение 8 месяцев. В микрокосмы подавался воздух в режиме круглосуточной продувки с помощью воздушных компрессоров Mouse Air Pump M-102 (1,8 л/мин, мощность 2,3 W) и мелкопористых распылителей. В микрокосм № 2 добавлена смесь солей металлов (раствор «M7»), которая была апробирована ранее в работе [7]. Добавки в воду микрокосмов раствора «M7» (по 1 мл в каждый микрокосм) производились два раза в неделю, раствор содержал соли тяжелых металлов (табл. 2). Суммарное добавление за период 5 недель составило 10 мл на весь объем воды в микрокосме.

Пробоподготовка и определение содержания элементов в осадке проводились следующим образом.

1. *Фильтрация проб.* Пробы, содержащие суспензию осадочного детритного материала, фильтровались через двойные плотные бумажные фильтры «синяя лента», предварительно взвешенные. Объем фильтра измерялся. Растворы переливались в заранее подготовленные (вымытые азотной кислотой) пластиковые флаконы с герметичными крышками. К пробам фильтра добавлялось 50 мкл концентрированной ультрачистой азотной кислоты (ultra pure MERCK) на каждые 25 мл раствора. Фильтры с осадочным материалом сушились сначала на воздухе, потом в эксикаторе до постоянного веса. По разнице между весом сухого чистого фильтра и сухого фильтра с образцом определялся вес пробы. Материал счищался с фильтра, растирался в яшмовой ступке (до гомогенного порошка) и помещался в стерильные чашки Петри, которые до анализа хранились в эксикаторе.

2. *Разложение и приготовление растворов для анализа.* Из растертых образцов сухого детрита отбирались навески от 30 до 50 мг (две параллельные пробы по стандартной методике). Навеска помещалась в герметичный тefлоновый сосуд, к каждой пробе добавля-

Таблица 1. Состав исследованных микрокосмов

Характеризуемый компонент	Микрокосм № 1 (контроль)	Микрокосм № 2 (опыт)
Моллюски <i>Viviparus viviparus</i> , экз.	6	6
Моллюски <i>Viviparus viviparus</i> , суммарная биомасса, г (сырой вес)	33,7	31,6
Макрофиты <i>Ceratophyllum demersum</i> , г (сырой вес)	16,3	15,1
Вода (отстоянная водопроводная вода), л	5	5

Таблица 2. Соли металлов, включенные в состав раствора М7, и добавка солей металлов в микрокосмы

Соль	Навеска соли для исходного раствора «М7» (1 л), мг	Добавление соли в микрокосм (при внесении 1 мл раствора «М7»), мкг
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	40	40
$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	40	40
$\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	20	20
$\text{MnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	40	40
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	40	40
ZnSO_4	40	40
$\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	40	40

лось по 1 мл концентрированной ультрачистой азотной кислоты (ultra pure MERCK), 0,5 мл пергидроли (30 % H_2O_2) и 0,1 мл HF. Разложение проводилось с помощью микроволновой системы MWS-2 при температуре 120 °С по соответствующей программе. В каждой партии проб для учета влияния реагентов проводился контрольный холостой опыт. После остывания до комнатной температуры все растворенные пробы разбавлялись деионизованной водой с доведением объема до 20 мл.

3. Анализ методом атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС). Концентрация элементов определялась методом ААС: в пламенном варианте на спектрометре КВАНТ-2А, электротермическом — на спектрометре КВАНТ-Z.ЭТА. Пределы обнаружения элементов составляли от 0,01 до 0,05 мкг/г. Контроль правильности анализа проводился с использованием Государственных стандартных образцов (ГСО) ионов анализируемых металлов и международных стандартных образцов NIST SRM 2976 mussel tissue. Средние отклонения от паспортных данных стандартных образцов составляли 5—10 %.

Результаты и их обсуждение

В условиях инкубации в период добавления солей (первые 5 недель) заметного повышения смертности моллюсков по сравнению с контролем не зарегистрировано, т. е. выявилась определенная степень толерантности при оценке по критерию смертности. Однако следует не забывать о том, что существуют и другие критерии оценки состояния организмов. К концу периода инкубации все моллюски погибли и в опыте (микрокосм № 2), и в контроле (микрокосм № 1 без добавок металлов). Характеристика микрокосмов после инкубации дана в табл. 3.

В обоих микрокосмах образовался осадок детрита. Детрит имел смешанное происхождение, формировался из тканей погибших моллюсков и фрагментов отмирающих частей растений. Учитывая важность детрита как компонента экологических систем, проводился анализ концентраций ряда металлов в нем. С этой целью из обоих микрокосмов (контрольного № 1 и опытного № 2) были взяты образцы детрита для определения содержания металлов. Результаты показали (табл. 4), что содержание почти всех измеренных металлов было выше в осадке микрокосма № 2, в воду которого добавлялась смесь металлов. Содержание свинца в осадках микрокосмов № 1 и № 2 практически не отличалось, что согласуется с тем, что этот металл не добавлялся. Содержание мышьяка в осадках микрокосмов также существенно не отличалось, при этом мышьяк в опыте в микрокосм также не добавлялся. Наиболее существенно увеличилось содержание в осадке кадмия и хрома, хотя следует отметить, что их содержание в осадке контрольного микрокосма наименьшее среди всех металлов. Это может объясняться тем, что кадмий и хром не играют такой роли в организмах, как железо, марганец, цинк, медь, входящие в состав ферментов, их содержание в живых тканях (из которых, в конечном счете, образовался осадок детрита) гораздо выше, чем содержание кадмия и хрома.

Представляется возможным допускать различные пути, ведущие к ассоциации металлов с детритом. В том числе следующие: 1) аккумуляция или сорбция металлов водными организмами, затем отмирание организмов и преобразование их тканей в детрит, содержащий ранее поглощенные или сорбированные металлы; 2) сорбция металлов уже образованным детритным материалом. Оба этих пути ведут к повышению содержания металлов в детрите.

Необходимо отметить сложность и многоаспектность вопроса о роли детрита в водных экосистемах и судьбе находящихся в них металлов. Важно то, что при разложении детрита возможно вторичное загрязнение поверхностных вод металлами, в том числе токсичными. Существует также возможность использования детрита некоторыми гид-

Таблица 3. Характеристика микрокосмов в конце инкубации

Характеризуемые компоненты микрокосма	Микрокосм № 1 (контроль)	Микрокосм № 2 (опыт)
Раковины моллюсков <i>Viviparus viviparus</i> , экз.	6	6
Раковины моллюсков <i>Viviparus viviparus</i> , г (суммарный вес)	14,2	12,7
Биомасса макрофитов <i>Ceratophyllum demersum</i> , г (сырой вес); в скобках указана биомасса в начале инкубации	2,0 (16,3)	1,2 (15,1)
Биомасса макрофитов <i>Ceratophyllum demersum</i> , г (сухой вес)	0,28	0,13
Детрит	Значительное количество	Значительное количество

Таблица 4. Содержание микроэлементов в осадке биогенного детрита, мкг/г сухого веса

Химический элемент	Микрокосм № 1 (контроль)	Микрокосм № 2 (опыт)	Отношение содержания в № 2 к содержанию в № 1, %	Вывод о содержании металла в опыте по сравнению с контролем
As	1,85	1,42	76,8	Различия нет
Co	0,67	9,36	1397,0	Превышение
Cd	0,62	2,25	362,9	Превышение
Pb	11,75	12,25	104,3	Различия нет
Cr	0,32	56,00	17 500,0	Превышение
Fe	4830	5788	119,8	Небольшое превышение
Mn	3233	4729	146,3	Превышение
Zn	1398	2501	178,9	Превышение
Cu	293	592	202,0	Превышение

робионтами в качестве пищи, откуда вытекает опасность накопления металлов в соответствующих звеньях пищевых цепей. Еще одна причина важности изучения химизма детрита и донных осадков связана с тем, что в определенных случаях проводятся работы по удалению донных отложений, включающие в себя и детрит, из водных объектов. С одной стороны, при этом удаляются и связанные с донными отложениями поллютанты, с другой — возможны взмучивание осадков и переход части поллютантов в воду. Поэтому изучение способности детрита накапливать металлы и другие химические элементы имеет большое значение.

Анализ данных о повышении концентрации тяжелых металлов в детритном материале осадков необходимо проводить с учетом всего

комплекса физических, химических и биологических процессов и факторов, которые участвуют в формировании качества воды [8—14]. Поскольку детрит имеет биогенное происхождение, полученные данные дополнительно раскрывают полифункциональную роль биоты в самоочищении вод, дополняют представления о биоценоотическом контроле качества воды [13, 15—17].

Выводы

Суммируя полученные результаты, можно отметить следующее:

1. Биогенный детрит, образовавшийся за 8 месяцев в контрольных микрокосмах с *Viviparus viviparus* и *Ceratophyllum demersum*, в которые не добавлялись тяжелые металлы, содержал элементы в концентрациях, представленных в следующем убывающем порядке (от более высоких концентраций к меньшим):



2. В экспериментальном микрокосме существенная часть добавленных в воду тяжелых металлов (Co, Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Cr) в конечном счете оказывалась в составе осадков биогенного детритного материала. В детрите, который образовался в экспериментальном микрокосме, элементы по концентрации располагались в следующем убывающем порядке (от более высоких концентраций к меньшим):



3. В биогенном детрите в микрокосме с добавленным раствором «М7» наиболее заметное увеличение содержания произошло для Cd (превышение концентрации более чем в 3 раза по сравнению с контролем), Co (более чем в 13 раз) и в особенности для Cr (более чем в 150 раз).

4. Высокий уровень превышения концентрации хрома над контролем указывает на большой потенциал биогенного детрита как материала, способного иммобилизовывать этот металл в количествах, на 2 порядка превышающих фоновое содержание хрома в детрите.

5. Поскольку изученный детрит образован из тканей организмов, новые данные дополнительно доказывают существенную полифункциональную роль биоты в самоочищении и улучшении качества вод, что согласуется с предложенной ранее теорией [8, 9, 11—18].

6. Полученные результаты (табл. 5) дополняют имеющиеся данные, характеризующие сопряжение биотических и геохимических процессов, роль биоты в миграции элементов и формировании геохимической среды (табл. 5), [18—23], в том числе в пресноводных объектах.

Таблица 5. Изучение роли биоты в миграции элементов (примеры)

Система или организмы	Элементы	Комментарий	Ссылка на работу
Водные моллюски <i>Lymnaea stagnalis</i> , <i>Unio tumidus</i> , <i>U. pictorum</i> , <i>Crassiana crassa</i> , <i>Anodonta cygnea</i>	C, N, P, Si, Al	Пеллеты <i>Lymnaea stagnalis</i> содержат: C: 69,74 %; N: 2,3—2,9 %; P: 0,4—0,5 %; Si: 1,1—1,7 %; Al: 0,054—0,059 %; ПАВ и СМС ингибировали образование пеллет	[19]
Водные микрокосмы с <i>Lymnaea stagnalis</i>	C, N, P, Si, Al	В присутствии 2 мг/л катионного ПАВ тетрадецилтриметиламмоний бромида (ТДТМА) скорость питания <i>Lymnaea stagnalis</i> снижалась; образование пеллет на 1 г сырого веса <i>Lymnaea stagnalis</i> снижалось на 41,7 % за период инкубации 72 часа	[20]
Биосфера, геохимическая среда	различные	Дана новая типология перемещений вещества и элементов в биосфере	[21]
Биосфера, геохимическая среда	различные	Даны основные функции биоты как регулятора параметров геохимической среды	[22]
Водные объекты	различные	Даны основные функции биоты в перемещении вещества и элементов в водных объектах в связи с самоочищением воды	[24]
Биогенный детрит в микрокосмах	As, Co, Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Cr	Показано накопление тяжелых металлов в биогенном детрите	Данная работа

Примечание: ПАВ — поверхностно-активные вещества; СМС — синтетические моющие средства.

7. Из факта наличия эффективного связывания добавленных в воду тяжелых металлов с биогенным детритом, доказанного в представленной работе, вытекает важное практическое следствие: если в воде водных объектов регистрируется повышенное содержание тяжелых металлов, то уровень реального загрязнения экосистемы еще выше, чем это кажется на первый взгляд. Причина этого в том, что наблюдаемое в воде содержание металлов — это лишь добавление к тому, что после попадания в воду уже связалось с биогенным детритом и как бы выпало из сферы нашего наблюдения при измерении металлов в воде. Это необходимо учитывать для объективной оценки уровня экологической опасности и неблагополучия в состоянии водных экологических систем.

Следует подчеркнуть, что в связи с целями государственной водной политики, задачами Национальной программы «Вода России —

XXI век», в число основных направлений улучшения состояния водного фонда входит разработка и внедрение технологий восстановления и оздоровления водных объектов [24]. В этой связи необходимо выявление и накопление научной информации о процессах и факторах, участвующих в перераспределении загрязняющих веществ в водных экосистемах, в том числе в миграции и накоплении элементов.

В последнее время все больше внимания уделяется накоплению фактов и разработке вопросов, необходимых для создания научной базы и разработки методов экоремедиации (экологических технологий очищения среды). Можно предсказать, что дальнейшее развитие исследований роли детрита в аккумуляции и иммобилизации элементов (включая тяжелые металлы и мышьяк) поможет совершенствовать формирующуюся научную базу экоремедиации и экоинженерных работ по реабилитации и восстановлению нарушенных водных объектов [18].

Полученные результаты доказывают существенную роль биогенного детрита, образованного изученными массовыми видами водных организмов (*Viviparus viviparus*, *Ceratophyllum demersum*) в миграции и аккумуляции элементов, в том числе тяжелых металлов и мышьяка, являющихся опасными для водной среды.

Авторы благодарят Е.А. Соломонову, Ю.А. Моисееву, И.В. Тропина и Г.Ю. Казакова за помощь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carr G.M., Neary J. Water Quality for Ecosystem and Human Health. Burlington: United Nations Environment Programme Global Environment Monitoring System // Water Programme. 2006. 132 p.
2. Саратовских Е.А., Коршунова Л.А., Рошупкина О.С., Скурлатов Ю.И. Ингибирование NADH-оксидоредуктазы соединениями металлов // Химическая физика. 2007. Т. 26. № 8. С. 46—53.
3. Яблоков А.В. Россия: здоровье природы и людей. М.: Галлея-принт, 2007. 224 с.
4. Остроумов С.А., Микус А.А. Изучение взаимодействия кадмия с водными моллюсками в связи с экологическим мониторингом // Вода: технология и экология. 2007. № 3. С. 68—77.
5. Остроумов С.А., Зубкова Е.И., Крупина М.В., Микус А.А., Тодераш И.К. Взаимодействие меди с гидробионтами в связи с экологическим мониторингом и изучением роли водных организмов в биогеохимических циклах // Вода: технология и экология. 2007. № 4. С. 54—68.
6. Остроумов С.А., Зубкова Е.И., Крупина М.В., Мунжцу О.В., Микус А.А., Тодераш И.К. О биогенной миграции меди в водных экосистемах // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. 2008. № 1 (5). С. 54—61.
7. Остроумов С.А. Изучение толерантности моллюсков в условиях полиметаллического загрязнения воды и длительной инкубации // Ecological Studies, Hazards, Solutions (ESHS). 2007. V. 12. P. 78—81.

8. *Остроумов С.А.* О биотическом самоочищении водных экосистем. Элементы теории // Доклады академии наук. 2004. Т. 396. № 1. С. 136—141.
9. *Ostroumov S.A.* Biological filtering and ecological machinery for self-purification and bioremediation in aquatic ecosystems: towards a holistic view. // *Rivista di Biologia / Biology Forum*. 1998. V. 91. P. 221—232.
10. *Ostroumov S.A.* Biological Effects of Surfactants. Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis, 2006. 279 p.
11. *Ostroumov S.A.* Inhibitory analysis of top-down control: new keys to studying eutrophication, algal blooms, and water self-purification // *Hydrobiologia*. 2002. V. 469. P. 117—129.
12. *Ostroumov S.A.* Aquatic ecosystem as a bioreactor: water purification and some other functions // *Rivista di Biologia / Biology Forum*. 2004. V. 97. P. 39—50.
13. *Остроумов С.А.* О полифункциональной роли биоты в самоочищении водных экосистем // *Экология*. № 6. 2005. С. 452—459.
14. *Остроумов С.А.* Гидробионты в самоочищении вод и биогенной миграции элементов. М.: МАКС Пресс, 2008. 200 с.
15. *Ostroumov S.A.* Polyfunctional role of biodiversity in processes leading to water purification: current conceptualizations and concluding remarks // *Hydrobiologia*. 2002. V. 469. P. 203—204.
16. *Остроумов С.А.* О некоторых вопросах поддержания качества воды и ее самоочищения // *Водные ресурсы*. 2005. Т. 32. № 3. С. 337—347.
17. *Остроумов С.А.* Биологический механизм самоочищения в природных водоемах и водотоках: теория и практика // *Успехи современной биологии*. 2004. Т. 124. № 5. С. 429—442.
18. *Остроумов С.А.* Подходы к очищению и оздоровлению водных объектов (фиторемедиация, биоремедиация, зооремедиация) в связи с теорией полифункциональной роли биоты в самоочищении вод // *Вода: технология и экология*. 2007. № 2. С. 49—69.
19. Пеллеты моллюсков в биогеохимических потоках С, N, P, Si, Al // Доклады академии наук. 2001. Т. 379. № 3. С. 426—429.
20. *Остроумов С.А., Колесников М.П.* Моллюски в биогеохимических потоках (С, N, P, Si, Al) и самоочищении воды: воздействие ПАВ // *Вестник Московского университета*. Сер. 16. Биология. 2003. № 1. С. 15—24.
21. *Остроумов С.А.* О роли гидробионтов в регуляции потоков вещества и миграции элементов в водных экосистемах // *Вестник Российской академии естественных наук*. 2002. Т. 2. № 3. С. 50—54.
22. *Остроумов С.А.* Поиск подходов к решению проблемы глобальных изменений: элементы теории биотическо-экосистемного механизма регуляции и стабилизации параметров биосферы, геохимической и геологической среды // *Вестник Московского университета*. Сер. 16. Биология. 2005. № 1. С. 24—33.
23. *Остроумов С.А.* О гидробиологическом механизме самоочищения водных объектов: от теории к практике // *Водное хозяйство России*. 2004. Т. 6. № 3. С. 193—201.
24. *Черняев А.М., Прохорова Н.Б., Белова Л.П., Крутикова К.В.* Воды России (состояние, использование, охрана) 2002 год. Екатеринбург: Издательство РосНИИВХ, 2003. 136 с.

Сведения об авторах:

Остроумов Сергей Андреевич, д. б. н., ведущий научный сотрудник лаборатории физико-химии биомембран биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, ar55@yandex.ru;

Демина Людмила Львовна, к. г.-м. н., ведущий научный сотрудник Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, demina@mail.ru.