

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННОГО  
АНАЛИЗА ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ РЕДКИХ  
И РАССЕЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В НЕКОТОРЫХ  
КОМПОНЕНТАХ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ  
(НА ПРИМЕРЕ Au)**

© 2010 С.А. Остроумов<sup>1</sup>, Г.М. Колесов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

<sup>2</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского  
Российской академии наук, Москва

**Ключевые слова:** водные экосистемы, детрит, моллюски, макрофиты, пресноводные гидробионты, редкие и рассеянные элементы, Au, *Viviparus viviparus*, *Unio pictorum*, *Ceratophyllum demersum*.

В условиях лабораторных водных микрокосмов впервые получены данные о концентрации Au и некоторых других элементов в детрите, образованном массово встречающимися видами водных организмов (моллюсками *Viviparus viviparus*, *Unio pictorum* и макрофитами *Ceratophyllum demersum*). Измерения проведены методом нейтронно-активационного анализа. Эти опыты еще раз проиллюстрировали значительную роль биогенного детрита в сопряжении гидробиологических и геохимических процессов в водных системах. Новые результаты дополняют имеющиеся сведения о содержании химических элементов в компонентах экосистем, в том числе водных систем. Полученные данные могут быть использованы при разработке научных основ мониторинга, а также ремедиации, восстановления и реабилитации водных объектов.

Содержание химических элементов в компонентах водных экосистем является одной из существенных их характеристик, исследование которых необходимо для мониторинга, понимания и прогнозирования состояния водных объектов. В водоемах и водотоках имеет место перемещение ряда элементов через толщу воды, с переносом веществ на границе вода — донные отложения, с биогеохимическими потоками элементов. Изучение биогенной миграции элементов — важное направление исследований биосферы [1]. Биогенная миграция элементов в водных экосистемах — как пресноводных, так и морских — связана с самоочищением воды и формированием ее качества [2, 3]. Существенно, что роль водных организмов в миграции элементов носит сложный характер и может проявляться и в поглощении, и в выделении вещества, и в оказании воздействия на многие другие процессы в экосистеме [2—5].

Для анализа фактов о роли организмов в биогенной миграции элементов в водных экосистемах необходимы сведения не только о накоплении элементов водными организмами, но и о содержании элементов в образце гидробионтами детритном материале [4], который поступает на дно водных систем и вносит вклад в формирование донных отложений.

Ранее проведенные исследования установили концентрации некоторых элементов в детритном материале, производимом водными моллюсками [4, 5]. Однако эти данные касались ограниченного круга химических элементов и не включали в себя сведения о содержании редких и рассеянных элементов — таких как, например, Au и некоторых других.

В литературе, насколько известно авторам данной статьи, отсутствовали сведения о содержании Au в детритном материале, образующем в модельных экосистемах после инкубации в них массово встречающихся видов водных организмов — таких как *Viviparus viviparus* L., *Unio pictorum* L. и *Ceratophyllum demersum* L.

Цель этого исследования — изучить биогенный детрит в экспериментальных экосистемах, представленных лабораторными микрокосмами, в которых содержались три вида указанных пресноводных организмов. В сформировавшемся в этих системах детрите впервые был определен ряд элементов, включая Au, с использованием метода нейтронно-активационного анализа (НАА), обладающего высокой чувствительностью. Сведения о концентрации этих элементов вносят вклад в познание роли биогенного органического материала осадков в распределении химических элементов в водных системах.

### Методика эксперимента

Эксперименты проводились в пресноводных микрокосмах. Микрокосмы были созданы с участием трех массово встречающихся видов пресноводных организмов — *Viviparus viviparus* L., *Unio pictorum* L. и *Ceratophyllum demersum* L. В микрокосмы вносились водные организмы и отстоянная водопроводная вода (ОВВ). Растения *Ceratophyllum demersum* были собраны в пруду в пойме р. Москва на территории Москвы, моллюски *Viviparus viviparus* и *Unio pictorum* — на относительно чистом участке реки в Нечерноземной зоне Европейской части России. Используемые в опыте микрокосмы охарактеризованы в табл. 1.

После формирования микрокосмов они инкубировались при комнатной температуре в течение семи с половиной месяцев (конец августа—середина апреля). Микрокосмы находились в это время в условиях постоянной аэрации путем подачи воздуха аквариумными компрессорами. К концу инкуба-

Таблица 1. Состав водных микрокосмов, использованных в экспериментах

Организмы	Микрокосм № 1	Микрокосм № 2
<i>Viviparus viviparus</i> , экз.	39	15
<i>Unio pictorum</i> , экз.	12	32
<i>Ceratophyllum demersum</i> , г (сырая масса)	2,4	2,4
Отстоянная водопроводная вода, л	3	3

ции моллюски погибли и на дне микрокосмов образовался осадок биогенного детрита. Осадок был отобран фильтрованием, высушен, растерт и проведен нейтронно-активационный анализ. Метод НАА в приложении к вопросам геохимии окружающей среды охарактеризован в [6, 7]. Метод ранее использовался нами для определения концентрации элементов в моллюсках [8, 9], причем, подтвердилась его эффективность для анализа содержания элементов в образцах биологического происхождения.

Пробоподготовка велась следующим образом: образцы для анализа предварительно высушивались при 105 °С, отбирались пробы массой по 15—25 мг и вместе с образцами сравнения (КН, ST-1, SGD-1, FFA, RUS-1, Allende, BCR и др.) и эталонами упаковывались в пакеты из алюминиевой фольги.

Затем образцы помещались в алюминиевый пенал и облучались 15—20 ч в тепловом канале ядерного реактора Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» с нейтронным потоком  $2,8 \times 10^{13}$  н/см<sup>2</sup>. После облучения образцы охлаждались, переупаковывались в чистые ампулы для уменьшения фона и измерялась активность 2—3 раза (через 5—7 и 15—30 дней после облучения) в течение 1000—5000 секунд на полупроводниковых (высокоразрешающих) германиевых детекторах «ORTEC» и 4096-канальном анализаторе импульсов NUC-8192 (EMG, Венгрия). Идентификация спектров и расчет содержания элементов проводились в автоматическом режиме с использованием компьютерных программ, разработанных в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН). Для нескольких элементов расчет содержания был получен экстраполяцией, что соответствует сложившейся и многократно апробированной практике.

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты определения Au с помощью НАА показаны в табл. 2. Необходимо отметить, что содержание Au сильно варьировало. Среднее

**Таблица 2.** Концентрация Au в образцах биогенной природы (нг/г, в пересчете на сухую массу), представляющих некоторые компоненты водных экосистем

Материал	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение
Биогенный детрит	25	270	147,5
Мягкие ткани моллюсков <i>Unio pictorum</i>	1	14	4,0
Раковины моллюсков <i>Unio pictorum</i>	6	140	56,0
Раковины моллюсков <i>Viviparus viviparus</i>	2	30	7,4

*Примечание:* Данные по биогенному детриту — новые результаты авторов. Данные о мягких тканях моллюсков *Unio pictorum* по материалам работы [8], раковинах моллюсков *Unio pictorum* — [8], моллюсков *Viviparus viviparus* — [9].

значение рассчитано с учетом всех имеющихся измерений. Из данных табл. 2 видно, что содержание Au в раковинах *Unio pictorum* было выше, чем в раковинах *Viviparus viviparus*, а содержание в детритном материале еще выше. Вместе с тем, содержание в детритном материале (усредненные данные) Au было ниже концентрации других исследованных и измеренных нами редких и рассеянных элементов ( $Nd > La > U > Hf > Th > Sm > Cs > Au$ ).

Необходимо подчеркнуть, что даже малые концентрации отдельных элементов в детрите представляют существенный интерес, поскольку потоки биогенного осадочного материала, формируемые водными организмами, имеют весьма значительные масштабы. Например, сделаны оценки для ряда водных экосистем (см. обзор [10]). По этим данным, потоки C, создаваемые водными моллюсками, достигали 11,9 кг на 1 м<sup>2</sup> площади дна экосистемы в год. Общий поток элементов, оседающих на дно вместе с компонентами одной из водных экосистем (Laholm Bay) площадью 60 км<sup>2</sup>, составлял 1711 т углерода и 235 т азота в год (см. обзор [10]).

Используя полученные данные о концентрации Au в детрите, можно сделать оценку приблизительного потенциала детрита в роли депо для содержания иммобилизованного в нем элемента (Au) на участках дна экосистем таких размеров, на которых скопилось, например, 1 кг или 1000 кг детрита (в расчете на сухую массу). Расчеты носят ориентировочный характер. Речь идет об оценке только потенциала детрита в качестве депо для ряда элементов и не означает автоматического переноса экспериментальных данных на природные экосистемы. Для сравнения приведены аналогично сделанные оценки для некоторых других

**Таблица 3.** Оценка приблизительного потенциала аккумуляции Au в сравнении с другими элементами (Hf, Cs) в биогенном детрите (по данным НАА)

Элемент	Среднее содержание в 1 г детрита (сухая масса), мкг	Приблизительный потенциал аккумуляции в детрите в пересчете на	
		1000 г детрита, мг	1000 кг детрита, мг
Au	0,1475	0,1475	147,5
Hf	2,01	2,01	2010
Cs	1,04	1,04	1040

элементов (гафния Hf, цезия Cs) того же периода периодической таблицы Д.И. Менделеева, что и Au. Концентрации этих элементов в биогенном детрите также были установлены в этой работе методом НАА. Гафний был взят для сравнения как элемент с близкой атомной массой (атомная масса гафния 178,49), цезий — как элемент, который находится в той же группе и в том же периоде периодической системы Д.И. Менделеева, что и золото — а именно, в первой группе и в шестом периоде. Результаты расчета представлены в табл. 3, во второй колонке приведены средние концентрации трех элементов (Au, Hf, Cs), измеренные в детрите, в последующих двух колонках — полученные в результате расчета цифры, характеризующие приблизительный потенциал аккумуляции этих элементов в биогенном детрите в составе донных отложений в водных объектах.

Отметим особенность исследованного детритного материала, отличающую его от суммарного осадочного материала в донных седиментах водных объектов. Она в том, что детрит сформировался за определенный отрезок времени в контролируемых условиях — из известных экспериментатору организмов массовых видов (в этот комплекс организмов входили моллюски двух видов и один вид макрофитов).

Необходимо дальнейшее изучение особенностей элементного состава детрита, поскольку его исходный состав в реальных условиях загрязняемых экосистем может модифицироваться в результате того, что некоторый вклад могут вносить элементы, дополнительно аккумулируемые детритом в результате антропогенного воздействия на экосистему. Таким антропогенным воздействием может быть загрязнение воды разными элементами вследствие поступления в воду тех или иных отходов или стоков.

В научной литературе сообщалось об элементном составе водных растений и их отмирающей массы, но элементный состав детрита, образован-

**Таблица 4.** Изучение содержания химических элементов в детрите водных организмов (примеры)

Виды организмов	Элементы	Примечания; ссылки
<i>Viviparus viviparus</i> , <i>Unio pictorum</i> , <i>Ceratophyllum demersum</i>	Au	Содержание золота в биогенном детрите варьировало от 0,025 до 0,27 (среднее — 0,15) г/кг детрита (на сухую массу); новые результаты авторов в данной статье
<i>Viviparus viviparus</i> , <i>Unio pictorum</i> , <i>Ceratophyllum demersum</i>	Ce, Se, La, Sb, Hf, Th, Sc, Sm, Cs и другие элементы	Новые результаты авторов
<i>Cardium edule</i>	N	Вместе с биодепозитами оседало 199 т азота на площади 60 км <sup>2</sup> ; Лахолм-Бэй [10]
<i>Mytilus edulis</i>	C	Вместе с биодепозитами оседало 60,0—80,7 г С на площади 1 м <sup>2</sup> [10]
<i>Lymnaea stagnalis</i> , <i>Unio tumidus</i> , <i>Unio pictorum</i> , <i>Crassiana crassa</i> , <i>Anodonta cygnea</i>	C, N, P, Si, Al	Состав пеллет <i>Lymnaea stagnalis</i> : C — 69,74 %; N — 2,3—2,9 %; P — 0,4—0,5 %; Si — 1,1—1,7 %; Al — 0,054—0,059 % [4]
<i>Lymnaea stagnalis</i> , <i>Unio tumidus</i> , <i>Unio pictorum</i> , <i>Crassiana crassa</i> , <i>Anodonta cygnea</i>	C, N, P, Si, Al	Состав пеллет выборки природного сообщества двустворчатых моллюсков при питании природным сестоном: C — 64,3 %, N — 2,73 %, P — 0,39 %, Si — 1,14 %, Al — 0,071 % [5]

ного моллюсками или при участии моллюсков, по-видимому, не изучался, за исключением предыдущих работ одного из авторов (табл. 4).

### Заключение

В работе впервые определена концентрация ряда элементов (Au, Hf, Cs) в биогенном детрите, полученном в условиях контролируемого эксперимента при совместной инкубации в микрокосме трех видов массово встречающихся пресноводных организмов (*Viviparus viviparus*, *Unio pictorum* и *Ceratophyllum demersum*), что способствует пониманию их роли в биогенной миграции элементов. Полученные данные позволяют полнее оценить роль биогенного детрита (в составе модельной экосистемы), об-

разуемого конкретными вышеуказанными видами организмов, как фактора концентрирования элементов.

Дальнейшие исследования помогут выявить новые факты о сопряжении экологических и биогеохимических процессов, связях между качеством воды и составом детрита, как важного компонента водных экосистем — водоемов и водотоков. В.И. Вернадский писал: «живое вещество в биосфере играет основную активную роль... В сущности, оно определяет все основные химические закономерности в биосфере» [11]. Еще одно характерное высказывание В.И. Вернадского: «Жизнь — живое вещество — поистине является одной из самых могущественных геохимических сил нашей планеты, а вызываемая ею биогенная миграция атомов представляет форму организованности первостепенного значения в строении биосферы» [12].

Впервые полученные в нашей работе данные о концентрации Au и некоторых других элементов в детрите, образованном массово встречающимися видами организмов *Viviparus viviparus*, *Unio pictorum* и *Ceratophyllum demersum*, продолжая наши предыдущие исследования, дают еще один конкретный пример, иллюстрирующий и конкретизирующий эти высказывания. Новые результаты дополняют имеющиеся сведения о содержании химических элементов в компонентах экосистем [13], в том числе водных систем [14].

Авторы благодарны Ю.А. Моисеевой, Е.А. Соломоновой, Г.Ю. Казакову, А.В. Клепиковой, сотрудникам МГУ и Института геохимии и аналитической химии РАН им. В.И. Вернадского за помощь и обсуждение.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернадский В.И. Биосфера. М.: Издательский дом «Ноосфера», 2001. 243 с.
2. Остроумов С.А. О полифункциональной роли биоты в самоочищении водных экосистем // Экология. 2005. № 6. С. 452—459.
3. 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.
4. Остроумов С.А., Колесников М.П. Пеллеты моллюсков в биогеохимических потоках C, N, P, Si, Al // ДАН. 2001. Т. 379. № 3. С. 426—429.
5. Остроумов С.А., Колесников М.П. Моллюски в биогеохимических потоках (C, N, P, Si, Al) и самоочищении воды: воздействие ПАВ // Вестник МГУ. Сер. 16. Биология. 2003. № 1. С. 15—24.
6. Kolesov G.M. Determination of microelements: neutron activation analysis in geochemistry and cosmochemistry // J. Anal. Chem. 1994. V. 49. No. 1. P. 50—58.
7. Kolesov G.M. Neutron activation analysis of environmental materials. // Analyst. 1995. V. 120. P. 1457—1460.
8. Остроумов С.А., Колесов Г.М., Сапожников Д.Ю. К разработке вопросов гидробиологического мониторинга водной среды: изучение содержания элементов в моллю-

- сках *Unio* методом нейтронно-активационного анализа // Проблемы экологии и гидробиологии. М.: МАКС Пресс, 2008. С. 47—53.
9. *Остроумов С.А., Колесов Г.М., Сапожников Д.Ю.* Содержание элементов в раковинах моллюсков *Viviparus viviparus*: изучение методом нейтронно-активационного анализа // *Ecological Studies, Hazards, Solutions*. 2009. V. 13. P. 113—117.
  10. *Ostroumov S.A.* Suspension-feeders as factors influencing water quality in aquatic ecosystems // *The Comparative Roles of Suspension-Feeders in Ecosystems*. Eds: R.F. Dame, S. Olenin. Dordrecht: Springer, 2004. P. 147—164.
  11. *Вернадский В.И.* Химическое строение биосферы Земли и её окружения. М.: Наука, 1965. 374 с.
  12. *Вернадский В.И.* Биосфера и ноосфера. М.: Наука, 1989. 264 с.
  13. *Добровольский Г.В.* О развитии некоторых концепций учения о биосфере // *Вода: технология и экология*. № 1. 2007. С. 63—68.
  14. *Моисеенко Т.И., Кудрявцева Л.П., Гашкина Н.А.* Рассеянные элементы в поверхностных водах суши: технофильность, биоаккумуляция, экотоксикология М.: Наука, 2006. 261 с.

**Сведения об авторах:**

Остроумов Сергей Андреевич, д. б. н., ведущий сотрудник лаборатории физико-химии биомембран биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, д. 1, стр. 12; e-mail: ar55@yandex.ru;

Колесов Геннадий Михайлович, заведующий лабораторией, Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН, 119991, Москва, ул. Косыгина 19; e-mail: drkolesov@mail.ru.