

НАКОПЛЕНИЕ АМЕРИЦИЯ-241 ДИАТОМЕЯМИ РЕКИ ЕНИСЕЙ¹Т.А. Зотина, А.Я. Болсуновский,
Л.Г. Бондарева*

В лабораторных экспериментах исследовалась способность трех видов диатомовых водорослей, входящих в состав фитопланктона реки Енисей, накапливать ²⁴¹Am. В экспериментах водоросли накапливали до 79 % америция из водного раствора. Удельные активности ²⁴¹Am в сухой биомассе и коэффициенты накопления составили для *Synedra sp.* 75-85 кБк/г и $(152-200) \cdot 10^3$ л/кг соответственно, для *D. vulgare* - 5-7 кБк/г и $(16-36) \cdot 10^3$ л/кг, для *A. formosa* – 18-48 кБк/г и $(30-71) \cdot 10^3$ л/кг. Интенсивность накопления ²⁴¹Am биомассой живых водорослей не превышала таковую для биомассы мертвых водорослей, что свидетельствует об энергонезависимом накоплении (биосорбции) ²⁴¹Am диатомеями. Удельные активности и коэффициенты накопления ²⁴¹Am исследованными видами водорослей не превышают аналогичных показателей для сестона реки Енисей, следовательно, можно предположить, что в составе сестона реки Енисей могут присутствовать частицы, имеющие большее сродство к ²⁴¹Am, по сравнению с диатомеями.

Река Енисей загрязнена трансурановыми радионуклидами вследствие деятельности Горно-химического комбината Минатома РФ. Трансурановые элементы (²³⁸, ²³⁹, ²⁴⁰Pu, ²⁴¹Am, ²³⁹Np) обнаружены в пойменных почвах, донных отложениях и биомассе водных растений реки [1, 2]. Неотъемлемым компонентом водных экосистем являются диатомовые водоросли, которые составляют основу фототрофной микрофлоры и, в частности, доминируют в фитопланктоне реки Енисей. Диатомовый планктон входит в состав взвешенного вещества (сестона), потоки которого играют существенную роль в миграции трансурановых элементов в водных экосистемах [3, 4]. ²⁴¹Am относится к числу наиболее радиотоксичных для биоты радионуклидов. Поведение ²⁴¹Am в речных экосистемах почти не исследовано.

Целью данной работы стала оценка интенсивности накопления Am-241 диатомовыми водорослями и их роли в накоплении америция сестоном реки Енисей.

Методы

В экспериментах использовали монокультуры диатомовых водорослей, выделенных из экосистемы реки Енисей (*Diatoma vulgare* и *Synedra sp.*) и полученных из коллекции Цюрихского университета (*Asterionella formosa*). Для экспериментов использовали воду, отобранную в реке Енисей и отфильтрованную стерильно через мембраны «Владипор» (Россия) с размером пор 1 мкм или 0.2 мкм.

Суспензии водорослей экспонировали в 0.5-литровых конических колбах, по 0.3-0.4 л в каждой, при освещении люминесцентными лампами (4 клк на дне колб) и температуре 19±1 °С. Колбы перемешивали встряхиванием.

В экспериментах использовали варианты (по три повторности в каждом): живые водоросли на свету, живые водоросли в темноте (колбы обертывали фольгой) и термически убитые водоросли [5]. Микроскопирование не выявило изменения морфологии или агрегирования клеток после термической обработки.

Массу водорослей определяли гравиметрически после концентрирования клеток на мембранах (1 мкм, Владипор, Россия) и высушивания при 80 °С до постоянного веса.

Америций вносили в воду в виде ²⁴¹Am(NO₃)₃. Начальная активность ²⁴¹Am в экспериментах составила 1.0-1.2 кБк/л. В контроле в воду вносили эквимольное количество азотной кислоты. Сразу после внесения

¹ Работа поддержана Лаврентьевским грантом СО РАН №76 и грантом Минобразования и науки РФ и CRDF № Y2-B-02-16.

* © Т.А. Зотина, А.Я. Болсуновский, Л.Г. Бондарева Институт биофизики СО РАН, 2006, e-mail: t_zotina@ibp.ru

раствора ^{241}Am pH возвращали до 7 добавлением NaOH. Затем в каждую колбу вносили аликвоту суспензии водорослей (10-15 мл). Также оставляли повторности воды с ^{241}Am , не содержащие клеток водорослей. pH измеряли перед каждым отбором проб и подводили до 7.

Изъятие ^{241}Am сестомом и водорослями из водной среды измеряли по изменению радиоактивности в воде, профильтрованной через мембраны, и по активности ^{241}Am , задержанной на фильтрах. Для измерения радиоактивности фильтры растворяли в смеси перекиси водорода (30 %) и азотной кислоты (конц.) при нагревании. Активность америция в полученных растворах и воде измеряли на гамма-спектрометре (Canberra, США) в пробе в 15 мл в стандартной цилиндрической геометрии.

Результаты

Виды водорослей, использованные в экспериментах, относятся к числу пелляльных диатомей, их клетки имеют близкую форму и размеры, однако отличаются в экологическом плане. Вид *Asterionella formosa* истинно планктонный, виды *Diatoma vulgare* и *Synedra sp.* являются литоральными [6]. В реке Енисей эти виды повсеместно встречаются в планктоне в свободной форме. Наши исследования показали, что на отдельных участках реки в фарватерных пробах основу биомассы фитопланктона формируют литоральные (бентосные) диатомеи. В экспериментах первые два вида находились в гомогенной суспензии, состоящей преимущественно из одиночных клеток. Клетки *Synedra sp.* находились в виде небольших скоплений, число клеток в которых достигало нескольких десятков. В ходе экспериментов прирост численности клеток наблюдался на свету только в случае с *A. formosa*. В темноте прироста водорослей не наблюдалось.

В экспериментах динамика накопления америция биомассой водорослей имела вид кривой с насыщением. Изъятие америция из воды водорослями: накопление биомассой и убыль америция из воды прекратились в эксперименте с *Asterionella* через 20 часов, а в эксперименте с *Diatoma* уже через 5 часов. После этого в системе наблюдалось равновесие. В случае с *Synedra*, равновесия в системе не наступило в течение 3 суток. Поэтому для оценки параметров накопления использованы данные для 24-го часа. Эксперименты длились 3 суток в случае с *Synedra* и *Asterionella* и 5 суток - в случае с *Diatoma*.

В таблице приведены основные параметры накопления ^{241}Am диатомовыми водорослями, полученные в экспериментах (среднее значение $\pm$ стандартное отклонение). Коэффициент накопления (КН) рассчитывался как отношение удельной активности ^{241}Am , накопленной биомассой (Бк/кг) к активности ^{241}Am в воде (Бк/л). Для расчета параметров накопления ^{241}Am использованы равновесные значения удельной активности и активности ^{241}Am в воде.

В эксперименте с *Synedra* значения активности америция, накопленные биомассой живых и мертвых водорослей, достоверно не отличались и составляли 284-296 Бк/л, или 28-32 % от активности америция в системе (вода + взвесь). В эксперименте с *Asterionella* живые активно делящиеся водоросли, живые нерастущие водоросли и мертвые водоросли накопили в биомассе равные в пределах ошибки величины активности америция (197-322 Бк/л). В равновесной стадии активность америция, изъятая водорослями из водной среды, составила 21 – 32 %. В эксперименте с *Diatoma* водоросли накопили примерно в 2 раза больше активности америция (558-694 Бк/л) в своей биомассе по сравнению с другими видами водорослей. Изъятие америция биомассой из водной среды составило 62-79 % от общей активности радионуклида в системе. Это можно объяснить значительно большей биомассой водорослей, использованной в эксперименте с *Diatoma*, по сравнению с экспериментами с другими видами (см. табл.). Достоверной разницы в накоплении америция (в абсолютных значениях активности) живыми и мертвыми водорослями в экспериментах не наблюдалось, как и в проведенных нами ранее экспериментах с сестомом реки Енисей, содержащим живые и мертвые водоросли [7].

Таблица

Параметры накопления ^{241}Am диатомовыми водорослями реки Енисей

Вид водорослей	Физиологическое состояние	Сухая биомасса, мг/л	^{241}Am , накопленный водорослями, Бк/л (%)	^{241}Am в биомассе, кБк/г (КН, л/кг)
<i>Synedra sp.*</i>	Живые на свету	3.1 $\pm$ 0.1	284 $\pm$ 33 (28)	75 152 $\times 10^3$
	Мертвые		296 $\pm$ 31 (32)	85 200 $\times 10^3$
<i>Asterionella formosa</i>	Живые на свету	6.5-17.8	271 $\pm$ 78 (32)	18 $\pm$ 5 (30 $\pm$ 11) $\times 10^3$
	Живые в темноте	7.0 $\pm$ 0.8	197 $\pm$ 90 (21)	28 $\pm$ 15 (42 $\pm$ 23) $\times 10^3$
	Мертвые	6.8 $\pm$ 0.2	322 $\pm$ 106 (31)	48 $\pm$ 16 (71 $\pm$ 22) $\times 10^3$
<i>Diatoma vulgare</i>	Живые на свету	97.5 $\pm$ 8.3	694 $\pm$ 43 (79)	6.9 $\pm$ 0.9 (36 $\pm$ 12) $\times 10^3$
	Живые в темноте	100.3 $\pm$ 7.3	558 $\pm$ 58 (62)	5.2 $\pm$ 0.4 (16 $\pm$ 2) $\times 10^3$

*данные для 24-го часа.

Величины удельной активности америция (накопленной единицей сухой массы водорослей) для *Synedra* составили 75-85 кБк/г. Удельные активности америция, накопленные биомассой живых нерастаущих (в темноте) и мертвых клеток *Asterionella*, составляли 28-48 кБк/г и достоверно не отличались. Значения удельной активности для живых делящихся клеток были немного меньше, что было обусловлено приростом биомассы водорослей в ходе эксперимента. Наименьшие удельные активности получены для *Diatoma* 5.2-6.9 кБк/г, что также обусловлено большей биомассой водорослей, использованной в эксперименте.

Ранее нами были проведены аналогичные эксперименты по оценке интенсивности накопления америция-241 сестоном реки Енисей, в которых были оценены параметры накопления радионуклида. В экспериментах было показано, что наибольший вклад в изъятие америция из водной среды вносят относительно крупные частицы размером больше 0.45 мкм, к которым относятся, в частности, диатомовые водоросли. Согласно полученным нами данным эффективность изъятия америция из водной среды нативным (частицы крупнее 0.15-0.25 мкм) сестоном реки Енисей составила около 50-60 % [7, 8]. Если вычесть активность америция, накопленную сестом с размером частиц 0.15-0.45 мкм, то получится, что фракция сестона с частицами крупнее 0.45 мкм, включающая клетки фитопланктона, изъяла из водной среды 35-37 % америция [7].

При этом удельные активности америция, накопленные крупным сестомом реки Енисей, составляли 233-386 кБк/г [7]. Значения, полученные нами для диатомовых водорослей, были существенно меньше. Следовательно, в сестоне реки Енисей могут находиться частицы, имеющие большую накопительную способность по отношению к америцию-241, чем клетки диатомовых водорослей.

По имеющимся в литературе данным доля ^{241}Am , ассоциированного с частицами взвешенного вещества в различных морских экосистемах, варьирует в широком диапазоне (от 10 до 90 %), что авторы обзора объясняют отличиями свойств частиц взвешенного вещества или их реакционной способностью по отношению к америцию [5]. В экспериментах с морской диатомеей *Thalassiosira pseudonana* водоросли изымали из водной среды до 80 % ^{241}Am [5].

Величины коэффициентов накопления (КН) радионуклидов отражают экологическую значимость организмов в процессе изъятия радионуклидов из водной среды. Величины КН, полученные нами для трех видов диатомей, находились в диапазоне $(1.6-20) \times 10^4$ л/кг. Наибольшие значения коэффициентов накопления америция получены в экспериментах с *Synedra*, а наименьшие – в экспериментах с *Diatoma*. Согласно имеющимся в литературе данным для ^{241}Am величина КН, полученная экспериментально для морской диатомеи *T.pseudonana*, после сделанного нами пересчета на сухую массу (из расчета доли сухой массы 10-20 % от сырой) составила $(4-8) \times 10^4$ [5]. По данным из другого источника, величины КН для пресноводного фитопланктона имели тот же порядок [9].

Величины КН америция, полученные нами для сестона реки Енисей с частицами > 0.45 мкм, составили $(4.8-7.9) \times 10^5$ [7], а в экспериментах, проведенных нами в 2000 г., значения КН америция сестомом реки Енисей с живыми водорослями на свету составили $(1.4-3.2) \times 10^5$ [8]. Т.е. КН ^{241}Am диатомеями не превышают коэффициенты накопления ^{241}Am сестомом.

Сравнение результатов проведенных экспериментов (табл.) показывает, что интенсивность накопления ^{241}Am биомассой живых водорослей не превышала таковую для биомассы мертвых водорослей, что свидетельствует об энергонезависимом накоплении (биосорбции) ^{241}Am диатомовыми водорослями. Это было показано также для морских диатомей [5] и подтверждает данные, полученные нами в экспериментах с сестомом [7]. Согласно данным того же автора [5], америций, накопленный в биомассе диатомей, был преимущественно (89 % от количества, накопленного клетками) связан с веществом клеточных стенок [10].

В наших экспериментах интенсивность накопления америция исследованными диатомовыми водорослями не превышала интенсивность накопления сестомом реки Енисей. Учитывая тот факт, что рассчитанные нами коэффициенты накопления для диатомей не ниже величин, полученных другими авторами, можно предположить, что в составе сестона реки Енисей могут присутствовать частицы, имеющие большее сродство к ^{241}Am , по сравнению с исследованными видами диатомовых водорослей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болсуновский А.Я. Радиоактивное загрязнение территории населенных пунктов Красноярского края в регионе размещения горно-химического комбината / А.Я. Болсуновский, В.П. Атурова, М. Бургрер, Э. Шмид // Радиохимия. - 1999. - Т. 41. - № 6. - С. 563-568.
2. Bolsunovsky A.Ya. Artificial radionuclides in aquatic plants of the Yenisei River in the area affected by effluents of a Russia plutonium complex // Aquatic ecology. 2004. Vol.38. p. 57-62.
3. Baxter M.S., Fowler S.W., Povinec P.P. Observations on plutonium in the oceans. // Applied radiation and isotopes. - 1995. - V. 46. - № 11. - P. 1213-1223.
4. Vintro L.L., Mitchell P.I., Condren O.M., Downes A.B., Papucci C., Delfanti R. Vertical and horizontal fluxes of plutonium and americium in the western Mediterranean and the Strait of Gibraltar. // The science of the total environment. - 1999. - V. 237/238. - P. 77-91.
5. Fisher N.S., Bjerregaard P., Fowler S.W. Interactions of marine plankton with transuranic elements. 1. Biokinetics of neptunium, plutonium, americium, and californium in phytoplankton. // Limnol.Oceanogr. - 1983. - V. 28. - № 3. - P. 432-447.

6. Забелина М.М. Определитель пресноводных водорослей СССР. Выпуск 4. Диатомовые водоросли / М.М. Забелина, И.А. Киселев, А.И. Прошкина-Лавренко, В.С. Шешукова. - М: Советская наука, 1951. – С.619.
7. Зотина Т.А. Исследование накопления америция-241 сестоном реки Енисей / Т.А. Зотина // Материалы конференции молодых ученых, посвященной М.А.Лаврентьеву. – Новосибирск. 2003. - С.113-117.
8. Болсуновский А.Я. Оценка интенсивности накопления ^{241}Am пробами альгобактериального сообщества р.Енисей / А.Я. Болсуновский, Т.А. Зотина, С.В. Косиненко // ДАН. - 2002. - Т. 385. - № 3. - С. 426-429.
9. Ikäheimonen T.K. Determination of transuranic elements, their behaviour and sources in the aquatic environment. Helsinki: STUK-A-194. - 2003. – P. 82.
10. Fisher N.S., Burns K.A., Cherry R.D., Heyraud M. Accumulation and cellular distribution of ^{241}Am , ^{210}Po , and ^{210}Pb in two marine algae. // Mar.Ecol.Prog.Ser. 1983.Vol. 11. P. 233-237.

ACCUMULATION OF AMERICIUM-241 BY DIATOMS OF THE YENISEI RIVER

**T.A. Zotina, A.Ya. Bolsunovsky,
L.G. Bondareva**

*The abilities of three species of diatom algae, belonging to phytoplankton of the Yenisei River to accumulate ^{241}Am were evaluated in laboratory experiments. In experiments up to 79% of ^{241}Am activity was concentrated by algae from water solution. Specific activity of ^{241}Am in dry biomass of diatoms and concentration factors were 75-85 kBq/g and $(152-200) \cdot 10^3 \text{ L/kg}$ consequently for *Synedra* sp., 5-7 kBq/g and $(16-36) \cdot 10^3 \text{ L/kg}$ for *D.vulgare*, 18-48 kBq/g and $(30-71) \cdot 10^3 \text{ L/kg}$ for *A.formosa*. Accumulation parameters of ^{241}Am by live algae did not exceed the parameters for dead algae. This implies the energy independent accumulation (biosorption) of americium by diatom algae. Specific activities of ^{241}Am in biomass of diatoms investigated and concentration factors did not exceed the similar parameters for native seston of the Yenisei River. Consequently, we may suggest the presence of particles with higher affinity to ^{241}Am in the seston of the Yenisei River.*