

ИНТЕНСИВНОСТЬ НАКОПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В БИОМАССЕ ВОДНЫХ РАСТЕНИЙ РЕКИ ЕНИСЕЙ

© 2011 А.Я. Болсуновский, М.Ю. Медведева, Ю.В. Александрова

Институт биофизики СО РАН, г.Красноярск

Поступила в редакцию 17.05.2011

После остановки ядерного реактора в 2010 г. активность техногенных радионуклидов в биомассе макрофитов реки Енисей значительно снизилась. Использование метода химического фракционирования позволило ранжировать радионуклиды по прочности связывания с биомассой макрофитов.

Ключевые слова: водные растения, река Енисей, техногенные радионуклиды, распределение в биомассе, химическое фракционирование

Река Енисей – основная водная артерия Красноярского края, по водности занимает первое место в России и является одной из крупнейших рек мира. На берегу реки вблизи г. Железногорска расположен Горно-химический комбинат (ГХК) Росатома, многолетняя деятельность которого привела к радиоактивному загрязнению поймы реки и гидробионтов [1-5]. В апреле 2010 г. на ГХК был остановлен последний ядерный реактор АДЭ-2 – один из источников поступления техногенных радионуклидов в р. Енисей. Кроме реактора в р.Енисей осуществляются технологические сбросы радиохимического завода и других производств ГХК. Высшие водные растения являются важным компонентом водных экосистем и обладают способностью активно накапливать радионуклиды, в том числе трансурановые элементы, в своей биомассе, что позволяет их использовать для биомониторинга и биоремедиации [2-6].

Цель работы: оценить интенсивность накопления радионуклидов техногенного происхождения в биомассе водных растений р.Енисей, отобранных в период действия ядерного реактора ГХК (до 2009 г.) и после его остановки (2010 г.).

Материалы и методы. С 1999 по 2010 гг. во время экспедиционных исследований отбирали пробы воды и водных растений р. Енисей как вблизи ГХК (около сел Атаманово и Усть-Кан), так и на расстоянии до 250 км по течению реки от ГХК (вблизи сел Каргино и

Стрелка). В качестве контроля отбирали пробы растений выше по течению от ГХК. Растения после отбора промывали речной водой и разделяли на виды. В данной работе исследовали образцы водной растительности 4 видов: *Fontinalis antipyretica* (водный мох), *Potamogeton lucens* (рдест блестящий), *Batrachium kauffmannii* (шелковник) и *Elodea canadensis* (элодея). Отобранная биомасса каждого вида растений разделялась на 2 части, одна из которых высушивалась и измерялась на содержание радионуклидов, а другая (сырая биомасса) – подвергалась химическому фракционированию [5-6]. Использованный метод последовательного химического фракционирования применяется для изучения распределения (прочности связывания) радионуклидов с биомассой растений [5-6]. Радионуклиды, находящиеся в обменной фракции, отделяли в результате обработки биомассы раствором $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (1М) в течение суток. Для определения нуклидов, находящихся в адсорбционной фракции, биомассу растений обрабатывали 0,1М раствором HCl в течение 20 мин. Радионуклиды, оставшиеся в биомассе после указанных выше обработок, считались прочно связанными со структурами растений. Далее, методом «мокрого сжигания» с использованием H_2O_2 (30%) и HNO_3 (конц.) разделялись радионуклиды, содержащиеся в органических соединениях и минеральном остатке биомассы. Дополнительное фильтрование обменной фракции через фильтр с размером пор 3 мкм позволило отделить внеклеточные частицы, прикрепленные к поверхности растений и проанализировать их отдельно (органоминеральный осадок обменной фракции). В сухой биомассе макрофитов, в полученных химических фракциях биомассы и органоминеральном осадке определяли активность γ -излучающих радионуклидов на гамма-спектрометре фирмы

Болсуновский Александр Яковлевич, доктор биологических наук, заведующий лабораторией радиоэкологии. E-mail: radecol@ibp.ru

Медведева Марина Юрьевна, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник. E-mail: medvedeva_m79@mail.ru

Александрова Юлиана Владимировна, ведущий инженер. E-mail: yuliyana_aleksandrova@mail.ru

«Canberra» (США) со сверхчистым германиевым детектором. Обработывали γ -спектры с помощью программного обеспечения Canberra Genie-2000 (США). Результаты приведены на дату отбора проб.

Результаты исследования. В табл. 1 приведены сравнительные данные по активности γ -излучающих радионуклидов в *F.antipyretica* и *P.lucens*, отобранных в р.Енисей в период действия реактора ГХК (1999-2009 гг.) и через несколько месяцев после его остановки (2010 г). До остановки реактора ГХК (до 2009 гг.) в погруженных макрофитах р. Енисей было обнаружено более 20 техногенных радионуклидов с удельной активностью от десятков до тысяч Бк/кг [2-5]. Среди исследованных видов макрофитов *F.antipyretica* показал наибольшую аккумуляционную способность по отношению к техногенным радионуклидам [2-4]. Анализ проб макрофитов через 4-6 месяцев после остановки реактора в 2010 г. показал значительное снижение активности большинства техногенных радионуклидов по сравнению с предыдущими годами. Так, активность короткоживущих радионуклидов реакторного происхождения (с периодами полураспада до 1 месяца – ^{24}Na , ^{51}Cr , ^{239}Np) в биомассе стала ниже пределов обнаружения (<MDA). Удельная активность радионуклидов с более длительными периодами полураспада (^{54}Mn , ^{65}Zn , ^{58}Co , ^{46}Sc) снизилась в десятки раз по сравнению с предыдущим периодом времени. Удельная активность долгоживущих радионуклидов (с периодами полураспада более одного года), например в водном мхе, в 2010 г. сократилась всего в 2-10 раз по сравнению с предыдущим периодом времени.

Радионуклиды техногенного происхождения ранее регистрировались в биомассе растений не только вблизи ГХК, но и на расстоянии до 250 км от ГХК по течению реки [2-4]. В пробах рдеста блестящего, собранных в 2010 г. на расстоянии до 250 км от ГХК, было зарегистрировано до 10 техногенных радионуклидов, в том числе ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{137}Cs и ^{152}Eu с удельной активностью до 6 Бк/кг. Выше по течению от ГХК в водных растениях регистрировался только один техногенный радионуклид глобального происхождения ^{137}Cs и его активность не превышала 2 Бк/кг [4].

Метод химического фракционирования позволяет получить данные о характере распределения радионуклидов по отдельным фракциям биомассы водных растений. Радионуклиды в обменной и адсорбционной фракциях в основном находятся на поверхности биомассы, а радионуклиды в органической фракции и минеральном остатке прочно связаны

со структурами биомассы. На рис. 1 в качестве примера показано ранжирование радионуклидов по прочности связывания в биомассе водного мха. Было показано, что ^{40}K и ^{54}Mn преимущественно накапливаются на поверхности водных растений и слабо связаны с их биомассой, ^{152}Eu и ^{137}Cs были прочно связаны с биомассой растений и находились, преимущественно, в составе минеральной фракции. Радионуклиды ^7Be , ^{65}Zn и ^{60}Co в основном равномерно распределялись между фракциями поверхности и биомассы.

Таблица 1. Максимальная удельная активность (Бк/кг \pm sd) техногенных радионуклидов в биомассе водного мха (*F.antipyretica*) и рдеста блестящего (*P.lucens*), отобранных в разные годы вблизи ГХК (с. Атаманово).

Радионуклид	<i>Fontinalis antipyretica</i>		<i>Potamogeton lucens</i>	
	1999-2009 годы	2010 год	1999-2009 годы	2010 год
^{24}Na	1850 \pm 900	<MDA	1250 \pm 110	<MDA
^{46}Sc	310 \pm 20	4,8 \pm 0,2	35 \pm 2	0,5 \pm 0,1
^{51}Cr	1970 \pm 300	<MDA	1850 \pm 110	<MDA
^{54}Mn	80 \pm 7	4,0 \pm 0,3	50 \pm 4	1,0 \pm 0,2
^{58}Co	120 \pm 10	3,4 \pm 0,2	32 \pm 2	1,3 \pm 0,4
^{59}Fe	80 \pm 6	0,8 \pm 0,3	15 \pm 2	0,55 \pm 0,25
^{60}Co	790 \pm 30	47 \pm 1	240 \pm 10	16 \pm 1
^{65}Zn	330 \pm 20	5,2 \pm 0,5	68 \pm 4	14 \pm 1
^{106}Ru	22 \pm 5	11 \pm 1	9 \pm 3	3 \pm 1,1
^{137}Cs	350 \pm 30	68 \pm 3	90 \pm 6	16 \pm 1
^{141}Ce	85 \pm 7	<MDA	24 \pm 3	0,7 \pm 0,2
^{144}Ce	80 \pm 12	3,7 \pm 0,8	17 \pm 3	2,9 \pm 0,6
^{152}Eu	70 \pm 3	39 \pm 1	18 \pm 1	0,6 \pm 0,5
^{154}Eu	20 \pm 2	14 \pm 1	5 \pm 1	1,6 \pm 0,2
^{239}Np	1490 \pm 50	<MDA	394 \pm 16	<MDA

У водного мха и рдеста наблюдалось схожее распределение радионуклидов по фракциям биомассы. В биомассе шелковника и элодеи распределение отдельных радионуклидов отличалось от вышеупомянутого. Так, у шелковника большая часть ^{60}Co и ^{137}Cs находилась на поверхности растения, а распределение ^{54}Mn варьировало от прочносвязанного до равномерно распределенного. В пробах элодеи ^7Be и ^{60}Co находились на поверхности растения, а ^{137}Cs распределялся равномерно между фракциями поверхности и биомассы. Было показано, что распределение радионуклидов в биомассе отдельных видов макрофитов р. Енисей варьировало в течение вегетации. Так, у рдеста блестящего доля прочносвязанного ^{137}Cs снизилась на 50% с августа по октябрь.

Таблица 2. Удельное содержание радионуклидов (Бк/кг±sd) в пробах рдеста блестящего (*P. lucens*), отобранных в 2010 г на разном расстоянии от ГХК.

Радионуклид	с.Атаманово (5 км)	с.Усть-Кан (25 км)	с.Каргино, (240 км)	п.Стрелка (250 км)
⁴⁰ K	1192 ± 63	1132±55	1057±56	1012± 53
⁴⁶ Sc	0,46 ± 0,12	<MDA	<MDA	0,31 ± 0,13
⁵⁴ Mn	1,1 ± 0,5	0,3±0,2	2,2±0,6	0,65 ± 0,13
⁵⁸ Co	1,3 ± 0,4	<MDA	0,4±0,13	1,0 ± 0,1
⁶⁰ Co	16 ± 1	8,9±0,5	6.0 ± 0,6	5,2 ± 0,3
⁶⁵ Zn	14 ± 1	3,3±0,6	4,1±1,7	2,1 ± 0,5
¹⁰³ Ru	1,7 ± 0,8	<MDA	<MDA	0,41 ± 0,13
¹⁰⁶ Ru	3,3 ± 1,9	<MDA	5,9±3.0	3,2 ± 1,0
¹²⁴ Sb	0,75 ± 0,33	1,9±0,5	3,3±1,3	0,27 ± 0,12
¹³⁷ Cs	16 ± 1	15±1	6,4±0,9	4,2 ± 0,4
¹⁵² Eu	3,3 ± 0,2	7,4±0,4	2,8±0,4	1,3 ± 0,1
²⁴¹ Am	1,4 ± 0,5	0,95±0,21	<MDA	0,8 ± 0,2

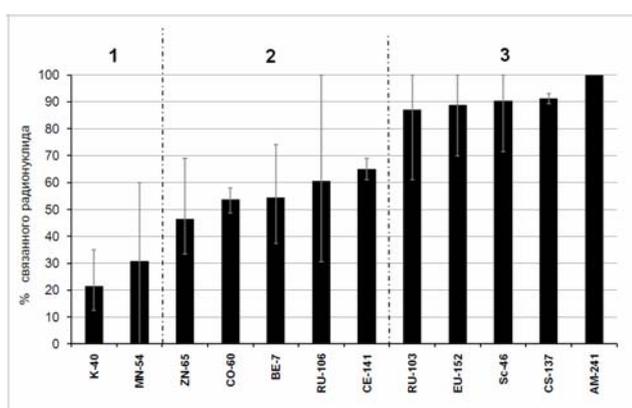


Рис. 1. Ранжирование радионуклидов по прочности связывания в биомассе водного мха (вариации с августа по октябрь 2010 г.): 1 – слабо связанные с биомассой радионуклиды (доля связанных с биомассой - менее 30%); 2 – равномерно распределенные в биомассе радионуклиды (от 30 до 70%); 3 – прочно связанные с биомассой радионуклиды (более 70%).

Гамма-спектрический анализ органо-минерального осадка обменной фракции показал, что его радионуклидный состав был различен у разных видов макрофитов, а также варьировал в зависимости от месяца отбора растений. Этот осадок может представлять собой организмы перифитона, а также минеральные частицы донных отложений. Для проверки источника происхождения осадка, были рассчитаны соотношения активностей радионуклидов ¹³⁷Cs/⁶⁰Co/¹⁵²Eu в осадке разных видов макрофитов. Исследования показали, что по вышеотмеченному соотношению радионуклидов органо-минеральный осадок биомассы водного мха (по всем месяцам отбора) наиболее близок к пробам донных отложений. Варибельность состава осадка рдеста блестящего и шелковника по месяцам отбора свидетельствует о наличии как частиц донных отложений, так и организмов перифитона.

Выводы:

1. До остановки реактора ГХК (до 2009 г.) в погруженных макрофитах р. Енисей было обнаружено более 20 техногенных радионуклидов с удельной активностью от десятков до тысяч Бк/кг. Максимальное содержание радионуклидов зарегистрировано в водном мхе *Fontinalis antipyretica*. После остановки реактора в 2010 г. активность короткоживущих радионуклидов реакторного происхождения (с периодами полураспада менее года) в биомассе макрофитов снизилась в десятки и более раз по сравнению с предыдущим периодом времени. Удельная активность долгоживущих радионуклидов (с периодами полураспада более года), например в водном мхе, сократилась всего в 2-10 раз по сравнению с предыдущим периодом времени. В пробах рдеста блестящего (*Potamogeton lucens*) 2010 г., собранных в р. Енисей на расстоянии до 250 км от ГХК были зарегистрированы до 10 техногенных радионуклидов, в том числе ⁶⁰Co, ⁶⁵Zn, ¹³⁷Cs и ¹⁵²Eu.

2. Последовательное химическое фракционирование водных растений р. Енисей показало, что у водного мха и рдеста блестящего наблюдалось схожее распределение радионуклидов по фракциям биомассы: ⁴⁰K и ⁵⁴Mn находились на поверхности растений или были слабо связаны с биомассой; ¹³⁷Cs и ¹⁵²Eu были прочно связаны с биомассой; ⁷Be, ⁶⁵Zn и ⁶⁰Co равномерно распределены между фракциями поверхности и биомассы. Для отдельных видов регистрировались изменения в распределении радионуклидов в биомассе в течение вегетации. Радионуклидный состав органо-минерального осадка на поверхности водных растений свидетельствует о наличии как частиц донных отложений (преимущественно у водного мха), так и организмов перифитона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Болсуновский, А.Я. Новые данные по содержанию трансурановых элементов в донных отложениях реки Енисей / А.Я. Болсуновский, А.И. Ермаков, Б.Ф. Мясоедов и др. // Доклады Академии наук. 2002. Т. 387. № 2. С. 233-236.
2. Болсуновский, А.Я. Накопление техногенных радионуклидов водными растениями реки Енисей в зоне влияния Горно-химического комбината / А.Я. Болсуновский, А.И. Ермаков, М. Бургер и др. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2002. Т.42. №2. С.194-199.
3. Сухоруков, Ф.В. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей / Ф.В. Сухоруков, А.Г. Дегерменджи, А.Я. Болсуновский и др. – Новосибирск.: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004. 286 с.
4. Bolsunovsky, A. Artificial radionuclides in aquatic plants of the Yenisei River in the area affected by effluents of a Russian plutonium complex // Aquatic Ecology. 2004. V. 38 (1). P. 57-62.
5. Bolsunovsky, A. Actinides and other radionuclides in sediments and submerged plants of the Yenisei River / A. Bolsunovsky, L. Bondareva // Journal of Alloys and Compounds. 2007. V. 444-445. P. 495-499.
6. Bolsunovsky, A. Accumulation and release of ²⁴¹Am by a macrophyte of the Yenisei River (*Elodea canadensis*) / A. Bolsunovsky, T. Zotina, L. Bondareva // Journal of Environmental Radioactivity. 2005. V. 81. №1. P. 33-46.

INTENSITY OF RADIONUCLIDES ACCUMULATION IN THE BIOMASS OF AQUATIC PLANTS IN YENISEI RIVER

© 2011 A.Ya. Bolsunovsky, M.Yu. Medvedev, Yu.V. Aleksandrova

Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk

After nuclear reactor stop in 2010 year activity of technogenic radionuclides in biomass of macrophytes in Yenisei river has considerably decreased. Use the method of sequential extraction has allowed to range radionuclides on durability of linkage with macrophytes biomass.

Key words: *aquatic plants, Yenisei river, technogenic radionuclides, distribution in biomass, sequential extraction*

Alexander Bolsunovsky, Doctor of Biology, Chief of the Radioecology Laboratory. E-mail: radecol@ibp.ru
Marina Medvedeva, Candidate of Biology, Minor Research Fellow. E-mail: medvedeva_m79@mail.ru
Yuliana Zlexandrova, Leading Engineer. E-mail: yuliyana_aleksandrova@mail.ru