

## ЭКОЛОГИЯ

УДК 574.52 : 574.24 : 597.5

doi: 10.17223/19988591/34/11

**А.Я. Болсуновский, Е.А. Трофимова, Д.В. Дементьев, А.Д. Карпов**

*Институт биофизики СО РАН, г. Красноярск, Россия*

### **Интенсивность накопления урана-238 представителями разных экологических уровней экосистемы р. Енисей**

*В результате многолетних исследований (2010–2013) получены данные по накоплению урана-238 в гидробионтах разных трофических уровней экосистемы р. Енисей. Пробы водного мха (*Fountinalis antipyretica*), зообентоса (*Philolimnogammarus viridis* и *Ph. Cyaneus*), сибирского хариуса (*Thymallus arcticus*) и щуки (*Esox lucius*) отбирали в районе ранее зарегистрированного повышенного содержания урана в воде р. Енисей (вблизи радиоактивных сбросов Горно-химического комбината Росатома). Показано, что уран способен эффективно накапливаться из воды в биомассе всех исследованных гидробионтов. Максимальные коэффициенты накопления (КН) урана получены для водного мха, что многократно превышает КН урана для зообентоса и мышечной ткани рыб. Средние значения КН урана для зообентоса статистически значимо превышают КН в мышцах рыб за весь период наблюдения. Не выявлено статистически значимых отличий в накоплении урана рыбами разного трофического уровня (хариус и щука).*

**Ключевые слова:** коэффициент накопления; трофический уровень; *Fountinalis antipyretica*; *Thymallus arcticus*; *Philolimnogammarus viridis*; *Philolimnogammarus cyaneus*; *Esox lucius*.

### **Введение**

В результате деятельности предприятий ядерно-топливного цикла, предприятий по обогащению и переработки полиметаллических руд в окружающую среду поступают значительные количества соединений урана. Уран – металл семейства актинидов, в природе находится в виде смеси из трёх изотопов (уран-238, уран-235 и уран-234), которые являются альфа-излучателями. Токсическое влияние урана на живые организмы основывается как на радиоактивных свойствах, так и на химическом воздействии на обмен веществ.

На берегу р. Енисей расположены крупнейшие промышленные предприятия Красноярского края, в том числе предприятия ядерно-топливного цикла Росатома (Горно-химический комбинат и Электрохимический завод). Ранее в пробах воды и донных отложениях р. Енисей вблизи Горно-химического

комбината (ГХК) зарегистрированы повышенные по сравнению с фоновыми районами концентрации урана-238 [1–2]. Показано [2], что миграционная способность урана в донных отложениях р. Енисей превышала миграционную способность многих техногенных радионуклидов на расстоянии до 250 км по течению реки от ГХК. Эти данные свидетельствуют о более высокой миграционной способности и биодоступности урана по сравнению с другими радионуклидами в экосистеме р. Енисей. Ранее в гидробионтах р. Енисей зарегистрирован широкий перечень техногенных радионуклидов, включая трансурановые элементы [3–6], однако содержанию изотопов урана в гидробионтах не уделялось должного внимания. По литературным данным [7–8], растворенный в воде уран может накапливаться в звеньях трофических сетей и потому представляет опасность для жизнедеятельности гидробионтов.

Цель исследования – сравнительная оценка интенсивности накопления урана-238 в биомассе гидробионтов, занимающих разные трофические уровни в экосистеме р. Енисей.

### Материалы и методики исследования

Пробы гидробионтов (макрофитов, зообентоса и ихтиофауны) и воды отбирали на участке р. Енисей, расположенном на расстоянии 85–90 км по течению реки от г. Красноярск (5–10 км от места сброса вод ГХК), с 2010 по 2013 г. Пробы гидробионтов и воды отбирали в период с июня по октябрь. В работе использован один из доминирующих на исследуемом участке реки видов макрофитов – водный мох *Foetinalis antipyretica* Hedw. Из представителей зообентоса использовали массовые виды гаммарид: *Philolimnogammarus viridis* Dyb. и *Ph. cyaneus* Dyb. Пробы макрофитов и зообентоса готовили для дальнейших исследований, как описано нами ранее [5].

Для исследования использовали два фоновых вида рыб, обитающих на среднем участке р. Енисей: сибирского хариуса (*Thymallus arcticus* P.) и щуку (*Esox lucius* L.). После отлова рыбу замораживали и хранили при  $-30^{\circ}\text{C}$ . Биологический анализ рыб проводился по стандартным методикам [9]. Для одной пробы использовали от 1 до 24 экз. рыб, параметры выборок приведены в табл. 1. Тела рыб разделяли на органы и ткани, для данного исследования мышцы выделяли в отдельную пробу. Пробы биоты сушили до постоянной массы при  $105^{\circ}\text{C}$  и затем озоляли в муфельной печи ПМ-1,0-20 (НПП «Теплоприбор», Россия) при  $450^{\circ}\text{C}$ .

Содержание урана-238 в биомассе гидробионтов (в мг/кг сухой массы) определяли инструментальным нейтронно-активационным анализом на исследовательском реакторе ФГАОУ ВО НИ ТПУ (г. Томск). Пробы воды после отбора консервировали азотной кислотой, фильтровали через фильтр «синяя лента». Содержание урана-238 в воде р. Енисей (в мг/л) определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе

Agilent 7500a. В качестве ошибок средних величин приведены стандартные ошибки среднего (SE). Коэффициенты накопления (КН) урана гидробионтами из воды рассчитывали как отношение концентрации урана в биомассе гидробионта к его концентрации в воде р. Енисей. Статистическую значимость различий средних определяли по двухвыборочному t-критерию для независимых выборок с разной дисперсией. Статистическая обработка полученных данных выполнена в программе Excel из пакета Microsoft Office 2013.

Т а б л и ц а 1 [Table 1]

**Биологическая характеристика выборок рыб**  
[Biological characterization of fish sampling]

Вид [Species]	Год отбора проб [Year of sampling]	Число экз. [Number]	Полная длина рыб, см [Total fish length, cm]	Полная масса рыб, кг [Total fish weight, kg]	Возраст [Age]
<i>Thymallus arcticus</i>	2010	23	18–27	0,04–0,18	1+–2+
	2011	13	23–28	0,11–0,20	2+–3+
	2012	36	19–33	0,06–0,33	5+–4+
<i>Esox lucius</i>	2010	3	13–14	0,17–0,18	1+–2+
	2011	2	31–40	0,20–0,44	3+–4+
	2012	10	34–51	0,28–1,10	3+–5+
	2013	4	52–57	0,85–1,24	6+

**Результаты исследования и обсуждение**

**Содержание урана-238 в гидробионтах р. Енисей.** Содержание урана-238 в биомассе представителей экосистемы р. Енисей приведено в табл. 2. Из рассмотренных гидробионтов в биомассе водного мха зарегистрированы максимальные значения концентрации урана (2,4 мг/кг). Представители водных мхов, в частности рода *Fontinalis*, накапливают высокие концентрации стабильных и радиоактивных изотопов металлов из воды [5, 10, 11]. В ряде работ отмечали более высокую способность водного мха накапливать уран-238 по сравнению с другими погруженными макрофитами, что позволяет использовать его как объект для биомониторинга [12, 13]. Преимущество мхов в накоплении микроэлементов из воды объясняется их морфологическими и физиологическими особенностями. Из-за отсутствия корневой системы водный мох, прикрепившись ризоидами к камням, поглощает элементы минерального питания, а также тяжёлые металлы и радионуклиды путём ионного обмена между растением и водной средой.

Представители отряда амфипод, к которым относятся использованные в нашем исследовании виды гаммарид (*Ph. viridis* и *Ph. cyaneus*), благодаря способности аккумулировать в своей биомассе тяжёлые металлы и микроэлементы могут использоваться как виды-индикаторы в биомониторинге антропогенного загрязнения водных экосистем [14]. Гаммариды среди ис-

следованных нами гидробионтов занимают промежуточный уровень по содержанию урана в своей биомассе (0,3 мг/кг), что ниже, чем у водного мха (2,4 мг/кг), но превышает содержание урана в мышцах рыб. По данным Szefer et. al., 1990 [15], содержание урана в биомассе морских бентосных ракообразных (*Mesidothea entomon*) также выше, чем в мышцах рыб (треска).

Т а б л и ц а 2 [Table 2]

**Содержание урана-238 (мг/л и мг/кг сухой массы) и коэффициентов накопления из воды в гидробионтах р. Енисей**  
**[Uranium-238 content (mg/l and mg/kg of dry weight) and concentration factors (CFs) from water in aquatic organisms of the Yenisei river]**

Год [Year]		Вода, $\times 10^{-3}$ мг/л [Water, $\times 10^{-3}$ mg/l]	<i>Fountinalis</i> <i>antipyretica</i>	<i>Philolimno-</i> <i>gammarus</i> <i>viridis</i> , <i>Ph. cyaneus</i>	<i>Thymallus</i> <i>arcticus</i> , мышцы [muscles]	<i>Esox</i> <i>lucius</i> , мышцы [muscles]
2010	Уран-238 [uranium-238]	0,81 $\pm$ 0,25	0,93 $\pm$ 0,41 0,52–1,35	0,21 $\pm$ 0,04 0,16–0,25	0,07 $\pm$ 0,04 0,02–0,15	0,02
	КН [CFs]		1160 $\pm$ 510 640–1670	260 $\pm$ 50 200–310	90 $\pm$ 50 20–180	21
	n	10	2	2	3	1
2011	Уран-238 [uranium-238]	0,29 $\pm$ 0,08	1,73 $\pm$ 0,20 1,29–2,41	0,19 $\pm$ 0,05 0,12–0,30	0,02	0,01
	КН [CFs]		5920 $\pm$ 680 4420–8270	650 $\pm$ 190 410–1020	25	34
	n	31	5	3	1	1
2012	Уран-238 [uranium-238]	0,48 $\pm$ 0,27	1,59 $\pm$ 0,17 1,02–1,93	0,26 $\pm$ 0,04 0,19–0,32	<0,02*	0,02
	КН [CFs]		3330 $\pm$ 360 2140–4060	530 $\pm$ 80 410–680	–	42
	n	21	5	3	2	1
2013	Уран-238 [uranium-238]	0,49 $\pm$ 0,28	1,78 $\pm$ 0,33 1,31–2,42	0,16	–	<0,02
	КН [CFs]		3640 $\pm$ 680 2690–4940	320	–	–
	n	17	3	1	–	1
КН среднее (2010–2013) [CFs average]			3960 $\pm$ 500	490 $\pm$ 80	70 $\pm$ 40	32 $\pm$ 6

Примечание: n – количество проб; \* – величины меньше предела обнаружения; «–» – проба не анализировалась; над чертой – среднее значение  $\pm$  se, под чертой – min-max значение.

[Note: n - number of samples; \* - values less than the detection limit; «–» - the sample was not analyzed; above the line - mean value  $\pm$  se, under the line - min-max value]

Мышцы рыб представляют интерес в плане содержания урана, так как чаще всего употребляются в пищу человеком. Большинство проб мышц исследованных видов рыб за весь период наблюдений отличалось низким содержанием урана (0,01–0,03 мг/кг), из чего следует, что уран обладает низкой

степенью биодоступности для рыб по сравнению с гаммаридами и водным мхом. Содержание урана в мышцах хариуса сильно колебалось за период исследований от 0,02 до 0,15 мг/кг. Максимальное значение содержания урана в мышцах хариуса (0,15 мг/кг) зарегистрировано в 2010 г. – последний год работы ядерного реактора ГХК. Минимальное значение и значение ниже предела обнаружения пришлось на 2011 и 2012 гг. соответственно. В мышцах щуки содержание урана за весь период исследований оставалось примерно на одном уровне. По литературным данным, низкие концентрации урана в мышцах, относительно других органов, характерны для представителей ихтиофауны как из водоёмов, расположенных вблизи урановых хвостохранилищ, так и для рыб из водоёмов, загрязнённых промышленными стоками [16–18]. Годовые колебания содержания урана в мышцах хариуса р. Енисей можно объяснить поступлением этого радионуклида в организм рыб не только из воды, но и из пищи. Ранее отмечалось, что у рыб, занимающих низкие трофические уровни (хариус по типу питания – бентофаг), содержание урана выше, чем у хищных рыб (щука), занимающих более высокий трофический уровень [8, 16, 19]. Например, у щуки из озера Анабаска (Канада) содержание урана в мышцах ниже по сравнению с сигом [20]. Это объясняется тем, что уран обладает низкой степенью ассимиляции и его концентрация с каждым трофическим уровнем должна снижаться [7].

**Коэффициенты накопления урана-238 гидробионтами из воды.** О способности элементов (техногенных радионуклидов или тяжёлых металлов) включаться в круговорот веществ можно судить по эффективности их накопления в представителях разных уровней экосистемы. Возможность накопления элемента в биомассе гидробионта из воды оценивается с помощью коэффициента накопления (КН). В случае если КН превышает единицу, можно говорить о накоплении элемента в теле гидробионта, если величина КН меньше единицы, накопления не происходит. Для расчёта КН урана биомассой гидробионтов использованы средние за период отбора проб значения содержания урана в воде р. Енисей в зоне влияния ГХК в 2010–2013 гг. (см. табл. 2). Данные по содержанию урана в воде в 2010 г. несколько выше, по сравнению с данными за 2011–2013 гг., что связано с последним годом работы ядерного реактора ГХК и его сбросами в р. Енисей [1]. Все полученные нами концентрации урана в воде р. Енисей ниже ПДК, установленного для этого элемента в питьевой воде, – 0,015 мг/л.

Как показали расчёты КН, уран из воды наиболее эффективно накапливается на уровне автотрофного звена экосистемы р. Енисей. Так, средние КН урана в биомассе водного мха (1160–5920) за весь период наблюдения статистически значимо ( $p > 0,95$ ) превышают средние КН в биомассе гаммарид (260–650) в 1,8–23 раза и в 17–185 раз в мышцах рыб (см. табл. 2). Как уже отмечали ранее, для водного мха, благодаря высокой аккумулярующей способности, характерны высокие КН из воды тяжёлых металлов и радионуклидов. В работе Т.А. Зотиной и др. [5] рассчитаны КН водным мхом из

воды для таких радионуклидов, как цезий-137, кобальт-60 и цинк-65. Сравнение величин КН этих радионуклидов и урана-238 свидетельствует, что эффективность накопления урана водным мхом из воды сопоставима с накоплением кобальта-60, превышает накопление цинка-65, но ниже, чем накопление цезия-137.

Средние КН урана-238 гаммаридами за весь период исследований держались примерно в пределах одного порядка – 260–650 (см. табл. 2). Такая стабильность в накоплении урана может свидетельствовать о его равномерном поступлении в организм гидробионта из воды. В среднем значения КН урана в телах гаммарид в 4–18 раз статистически значимо ( $p > 0,95$ ) превышают КН в мышцах рыб (32–70) за весь период наблюдения. Этот результат согласуется с данными для ракообразных – КН урана из воды морским тараканом в 10 раз превышал КН урана в мышцах рыб [15].

Согласно ранее полученным данным для енисейского хариуса, накопление техногенных радионуклидов в телах рыб происходит более активно из воды, чем из пищи [21]. В нашей работе мы не получили статистически значимых различий в накоплении урана при изменении трофического уровня рыбы, хотя ранее в работе Pantelica et. al. [16] показано, что у хищных рыб коэффициенты накопления урана из воды р. Дунай ниже, чем у бентофагов. Полученные нами КН урана для мышц рыб сравнимы (при переводе на сырую массу) со значениями, рекомендованными МАГАТЭ для съедобных частей пресноводных рыб. Так, КН урана в мышцах большинства проб енисейских рыб составили 32–70, а значения КН урана по данным МАГАТЭ – 10 (IAEA-364) [22]. Эффективность накопления урана в мышцах енисейского хариуса сравнима с накоплением техногенного радионуклида цезий-137 [21]. Таким образом, по интенсивности накопления урана из воды все исследуемые гидробионты р. Енисей могут быть ранжированы следующим образом: водный мох > гаммариды > хариус  $\approx$  щука.

### Заключение

Исследования показали, что представитель автотрофного звена экосистемы р. Енисей – водный мох – накапливает максимальные концентрации урана-238 в своей биомассе. По мере продвижения по трофическим уровням экосистемы концентрации урана в биомассе гидробионтов снижались. Гаммариды как консументы первого порядка в рассматриваемой трофической цепи занимали второе место по содержанию урана, а представители ихтиофауны – консументы второго порядка и терминальное звено данной экологической цепи – третье. Оценка коэффициентов накопления урана показала, что уран из воды способен эффективно накапливаться в биомассе всех исследованных гидробионтов реки. Наиболее высокие КН урана получены для водного мха, где максимальный КН урана достигает 8 270, что многократно превышает максимальные КН для гаммарид (1020) и мышечной ткани рыб

(42–180). Не выявлено статистически значимых отличий в накоплении урана рыбами разного трофического уровня (хариус и щука). Полученные КН урана сопоставимы с опубликованными значениями КН техногенных радионуклидов для водного мха и рыб р. Енисей.

### Литература

1. Болсуновский А.Я., Жижаев А.М., Сапрыкин А.И., Дегерменджи А.Г., Рубайло А.И. Первые данные по содержанию урана в воде бассейна реки Енисей в зоне влияния предприятий Росатома // Доклады Академии наук. 2011. Т. 439, № 3. С. 383–388.
2. Болсуновский А.Я., Дегерменджи А.Г. Сравнение миграционной способности урана и техногенных радионуклидов в донных отложениях реки Енисей // Доклады Академии наук. 2013. Т. 448, № 5. С. 571–575.
3. Болсуновский А.Я., Суковатый А.Г. Радиоактивное загрязнение водных организмов реки Енисей в зоне влияния Горно-химического комбината // Радиационная биология. Радиоэкология. 2004. Т. 44, № 3. С. 361–366.
4. Bolsunovsky A., Bondareva L. Actinides and other radionuclides in sediments and submerged plants of the Yenisei River // Journal of alloys and compounds. 2007. № 444–445. PP. 495–499.
5. Зотина Т.А., Трофимова Е.А., Болсуновский А.Я., Анищенко О.В. Эффективность трофического переноса радиоактивных и стабильных изотопов металлов к рыбам-бентофагам р. Енисей // Journal of Siberian Federal University. Biology. 2013. Т. 6, № 1. С. 96–107.
6. Трофимова Е.А., Зотина Т.А., Дементьев Д.В., Болсуновский А.Я. Накопление техногенных радионуклидов хищными и мирными рыбами реки Енисей // Вопросы радиационной безопасности. 2014. № 4. С. 55–61.
7. Swanson S.M. Food-chain transfer of U-series radionuclides in a northern Saskatchewan aquatic system // Health physics. 1985. Vol. 49, № 5. PP. 747–770.
8. Kraemer L.D., Evans D. Uranium bioaccumulation in freshwater ecosystem: Impact of feeding ecology // Aquatic Toxicology. 2012. № 124–125. PP. 163–170.
9. Вышегородцев А.А., Скопцова Г.Н., Чупров С.М., Зуев И.В. Практикум по ихтиологии: учеб. пособие. Красноярск : КрасГУ, 2002. 127 с.
10. 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. № 38. PP. 57–62.
11. Bolsunovsky A. Chemical Fraction of radionuclides and stable elements in aquatic plants of the Yenisei River // Environmental science technology. 2011. № 45. PP. 7143–7150.
12. Pratas J., Favas P.J.C., Paulo C., Rodrigues N., Prasad M.N.V. Uranium accumulation by aquatic plants from uranium-contaminated water in central Portugal // International Journal of phytoremediation. 2012. № 14. PP. 221–234.
13. Favas P.J.C., Pratas J., Varun M., D'Souza R., Paul M.S. Accumulation of uranium by aquatic plants in field conditions: Prospects for phytoremediation // Science of the total environment. 2014. № 470–471. PP. 993–1002.
14. Zhou Q., Zhang J., Fu J., Shi J., Jiang G. Biomonitoring: an appealing tool of assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem // Analytica chimica acta. 2008. № 606. PP. 135–150.
15. Szefer P., Szefer K., Falandysz J. Uranium and thorium in muscle tissue of fish taken from the southern Baltic // Helgoländer Meeresunters. 1990. № 44. PP. 31–38.



16. Pantelica A., Ene A., Georgescu I.I. Instrumental neutron activation analysis of some fish species from Danube River in Romania // *Microchemical Journal*. 2012. № 103. PP. 142–147.
17. Skipperud L., Stromman G., Yunusov M., Stegnar P., Uralbekov B., Tilloboiev H., Zjazjev G., Heier L.S., Rosseland B.O., Salbu B. Environmental impact assessment of radionuclides and metal contamination at the U sites Taboshar and Digmai, Tajikistan // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013. № 123. PP. 50–62.
18. Stromman G., Rosseland B.O., Skipperud L., Burkibaev L.M., Uralbekov B., Heier L.S., Salbu B. Uranium activity ratio in water and fish from pit lakes in Kurday, Kazakhstan and Taboshar, Tajikistan // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013. № 123. PP. 71–78.
19. Swanson S.M. Levels of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  and total U in fish near a Saskatchewan uranium mine and mill // *Health physics*. 1983. Vol. 45, № 1. PP. 67–80.
20. Waite D.T. The effect of uranium mine tailings on radionuclide concentrations in Langley Bay, Saskatchewan, Canada // *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 1988. № 17. PP. 373–380.
21. Зотина Т.А., Трофимова Е.А., Болсуновский А.Я. Радионуклиды в хариусе сибирском на радиационно загрязнённом участке среднего течения р. Енисей // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2012. Т. 52, № 3. С. 305–311.
22. IAEA 1994, Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments // IAEA Technical Reports Series No. 364. International Atomic Energy Agency, IAEA, Austria, Vienna.

*Поступила в редакцию 16.02.2016 г.; повторно 17.05.2016 г.;  
принята 25.05.2016 г.; опубликована 23.06.2016 г.*

#### **Сведения об авторах:**

**Болсуновский Александр Яковлевич** – д-р биол. наук, зав. лаборатории радиоэкологии Института биофизики СО РАН (г. Красноярск, Россия).

E-mail: [radecol@ibp.ru](mailto:radecol@ibp.ru)

**Трофимова Елена Александровна** – м.н.с. лаборатории радиоэкологии Института биофизики СО РАН (г. Красноярск, Россия).

E-mail: [e.trofimova11@yandex.ru](mailto:e.trofimova11@yandex.ru)

**Дементьев Дмитрий Владимирович** – канд. биол. наук, н.с. лаборатории радиоэкологии Института биофизики СО РАН (г. Красноярск, Россия).

E-mail: [dementyev@gmail.com](mailto:dementyev@gmail.com)

**Карпов Антон Дмитриевич** – инж. лаборатории радиоэкологии Института биофизики СО РАН (г. Красноярск, Россия).

E-mail: [kasta\\_anton@mail.ru](mailto:kasta_anton@mail.ru)

Bolsunovsky AY, Trofimova EA, Dementyev DV, Karpov AD. Accumulation of uranium-238 by representatives of different ecological levels in the Yenisei River ecosystem. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya – Tomsk State University Journal of Biology*. 2016;2(34):161–171. doi: 10.17223/19988591/34/11 In Russian, English summary

**Alexander Y. Bolsunovsky, Elena A. Trofimova, Dmitry V. Dementyev, Anton D. Karpov**

*Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation*

### **Accumulation of uranium-238 by representatives of different ecological levels in the Yenisei River ecosystem**

The aim of the research was a comparative evaluation of the intensity of uranium-238 accumulation in the biomass of aquatic organisms, occupying different trophic levels



in the ecosystem of the Yenisei river. Previously, uranium-238 at concentrations higher than the background ones was detected in water and sediment samples of the Yenisei River collected close to the discharge site of one of the Rosatom facilities (the Mining-and-Chemical Combine). However, radioecological studies of the Yenisei River ecosystem have not focused on uranium isotopes in aquatic organisms so far. The toxic effects of uranium on living organisms are known to be based on its both radioactive and chemical properties.

We conducted a study on accumulation of uranium-238 in aquatic organisms at different trophic levels in the Yenisei River ecosystem between 2010 and 2013. We collected samples of aquatic moss (*Foetinalis antipyretica*), zoobenthos (*Philolimnogammarus viridis* and *Ph. cyaneus*), arctic grayling (*Thymallus arcticus*), and pike (*Esox lucius*) from the Yenisei region at a distance of 85-90 km downstream of Krasnoyarsk (5-10 km downstream of the radioactive discharge of the Mining-and-Chemical Combine). Data on samples are shown in Table 1. We determined uranium concentration in the samples of aquatic organisms by neutron activation analysis, in water - by ICP-MS (Table 2).

The study shows that uranium can be effectively concentrated from water and accumulate in the biomass of all aquatic organisms used in experiments. The highest uranium concentration factors (CFs) were obtained for aquatic moss, and they were several times higher than the uranium CFs for zoobenthos and fish muscles. Based on the uranium concentration from water, all aquatic organisms of the Yenisei River used in this study can be ranked as follows: aquatic moss > gammarids > grayling ≈ pike. No statistically significant difference has been found between uranium accumulation by fish of different trophic levels (Arctic grayling and pike). The uranium CFs obtained in this study is comparable with the literature data on the CFs of artificial radionuclides for aquatic moss and fish of the Yenisei River.

*The article contains 2 Tables, 22 References.*

**Key words:** concentration factor; trophic level; *Foetinalis antipyretica*; *Thymallus arcticus*; *Philolimnogammarus viridis*; *Philolimnogammarus cyaneus*; *Esox lucius*.

## References

1. Bolsunovskii AY, Degermendzhi AG, Zhizhaev AM, Rubailo AI, Saprykin AI. First data on the uranium content in water of the Yenisei River basin in the area affected by the operation of Rosatom plant. *Doklady Earth Sciences*. 2011;439(1):1010-1015. doi: [10.1134/S1028334X11070208](https://doi.org/10.1134/S1028334X11070208)
2. Bolsunovskii AY, Degermendzhi AG. Comparison of mobility of uranium and technogenic radionuclides in bottom sediments of the Yenisei River. *Doklady Earth Sciences*. 2013;448(2):221-224. doi: [10.1134/S1028334X13020116](https://doi.org/10.1134/S1028334X13020116)
3. Bolsunovsky AY, Sukovatyi AG. Radioactive contamination of aquatic organisms of the Yenisei River in the area affected by the activity of the mining-and-chemical combine. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2004;44(3):361-366. In Russian
4. Bolsunovsky A, Bondareva L. Actinides and other radionuclides in sediments and submerged plants of the Yenisei River. *J Alloys and Compounds*. 2007;444-445:495-499.
5. Zotina TA, Trofimova EA, Bolsunovsky AY, Anishenko OV. Efficacy of trophic transfer of radioactive and stable isotopes of metals to zoobenthos-feeding fish of the Yenisei River. *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2013;6(1):96-107. In Russian, English Summary
6. Trofimova EA, Zotina TA, Dementyev DV, Bolsunovsky AY. Accumulation of artificial radionuclides by piscivorous and non-predatory fish of the Yenisei River. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti*. 2014;4:55-61. In Russian

7. Swanson SM. Food-chain transfer of U-series radionuclides in a northern Saskatchewan aquatic system. *Health Phys.* 1985;49(5):747-770. PMID: [4066338](#)
8. Kraemer LD, Evans D. Uranium bioaccumulation in freshwater ecosystem: Impact of feeding ecology. *Aquatic Toxicology.* 2012;124-125:163-170. doi: [10.1016/j.aquatox.2012.08.012](#)
9. Vyshegorodtsev AA, Skoptsova GN, Chuprov SM, Zuev IV. Praktikum po ikhtiologii. Ucheb. Posobie [Workshop on ichthyology. Study guide]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State University Publ.; 2002. 127 p. In Russian
10. 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;38:57-62. doi: [10.1023/B:AECO.0000020950.43944.ec](#)
11. Bolsunovsky A. Chemical Fraction of radionuclides and stabile elements in aquatic plants of the Yenisei River. *Environmental Science Technology.* 2011;45:7143-7150. doi: [10.1021/es2008853](#)
12. Pratas J, Favas PJC, Paulo C, Rodrigues N, Prasad MNV. Uranium accumulation by aquatic plants from uranium-contaminated water in central Portugal. *Int J Phytoremediation.* 2012;14:221-234. PMID: [22567707](#)
13. Favas PJC, Pratas J, Varun M, D'Souza R, Paul MS. Accumulation of uranium by aquatic plants in field conditions: Prospects for phytoremediation. *Sci Total Environ.* 2014;470-471:993-1002. doi: [10.1016/j.scitotenv.2013.10.067](#)
14. Zhou Q, Zhang J, Fu J, Shi J, Jiang G. Biomonitoring: an appealing tool of assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem. *Anal Chim Acta.* 2008;606(2):135-150. PMID: [18082645](#)
15. Szefer P, Szefer K, Falandysz J. Uranium and thorium in muscle tissue of fish taken from the southern Baltic. *Helgoländer Meeresunters.* 1990;44(1):31-38. doi: [10.1007/BF02365429](#)
16. Pantelica A, Ene A, Georgescu II. Instrumental neutron activation analysis of some fish species from Danube River in Romania. *Microchemical Journal.* 2012;103:142-147. doi: [10.1016/j.microc.2012.02.005](#)
17. Skipperud L, Stromman G, Yunusov M, Stegnar P, Uralbekov B, Tilloboev H, Zjazjev G, Heier LS, Rosseland BO, Salbu B. Environmental impact assessment of radionuclides and metal contamination at the U sites Taboshar and Digmai, Tajikistan. *J Environ Radioact.* 2013;123:50-62. doi: [10.1016/j.jenvrad.2012.05.007](#)
18. Stromman G, Rosseland BO, Skipperud L, Burkibaev LM, Uralbekov B, Heier LS, Salbu B. Uranium activity ratio in water and fish from pit lakes in Kurday, Kazakhstan and Taboshar, Tajikistan. *J Environ Radioact.* 2013;123:71-78. doi: [10.1016/j.jenvrad.2012.05.014](#)
19. Swanson SM. Levels of <sup>226</sup>Ra, <sup>210</sup>Pb and total U in fish near a Saskatchewan uranium mine and mill. *Health Physics.* 1983;45(1):67-80. PMID: [6688247](#)
20. Waite DT, Joshi SR, Sommerstad H. The effect of uranium mine tailings on radionuclide concentrations in Langley Bay, Saskatchewan, Canada. *Arch Environ Contam Toxicol.* 1988;17(3):373-380. PMID: [3377540](#)
21. Zotina TA, Trofimova EA, Bolsunovsky AY. Radionuclides in Arctic Grayling from Radioactively Contaminated Stretch in the Middle Reach of the Yenisei River. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya.* 2012;52(3):305-311. In Russian, English Summary
22. IAEA 1994, Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments. IAEA Technical Reports Series No. 364. International Atomic Energy Agency, IAEA, Austria, Vienna.

Received 16 February 2016; Revised 17 May 2016;

Accepted 25 May 2016; Published 23 June 2016.

**Bolsunovsky Alexander Y**, Dr. Sci. (Biol.), Head of Radioecology Laboratory, Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation.

E-mail: [radecol@ibp.ru](mailto:radecol@ibp.ru)

**Trofimova Elena A**, Junior Researcher, Radioecology Laboratory, Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation.

E-mail: [e.trofimova11@yandex.ru](mailto:e.trofimova11@yandex.ru)

**Dementyev Dmitry V**, Cand. Sci. (Biol.), Researcher, Radioecology Laboratory, Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation.

E-mail: [dementyev@gmail.com](mailto:dementyev@gmail.com)

**Karpov Anton D**, Technician, Radioecology Laboratory, Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation.

E-mail: [kasta\\_anton@mail.ru](mailto:kasta_anton@mail.ru)