

Оценка переноса техногенных радионуклидов в трофических сетях реки Енисей

Е. А. ТРОФИМОВА, Т. А. ЗОТИНА, А. Я. БОЛСУНОВСКИЙ

*Институт биофизики СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок
E-mail: t_zotina@ibp.ru*

АННОТАЦИЯ

Оценивали эффективность переноса гамма-излучающих радионуклидов в трофических сетях, включающих макрофиты, зообентос, рыб-бенто- и ихтиофагов, на радиационно-загрязненном участке р. Енисей. Выявлены существенные отличия в эффективности переноса природных и техногенных радионуклидов между компонентами разных трофических уровней. Выявлены значительные видовые отличия в накоплении радионуклидов рыбами-ихтиофагами из пищи.

Ключевые слова: водный мох, зообентос, хариус, елец, щука, налим.

Река Енисей загрязнена техногенными радионуклидами в результате многолетней работы Горно-химического комбината (ГХК, РОСАТОМ), который расположен на правом берегу реки, в 60 км ниже г. Красноярск. Техногенные радионуклиды зарегистрированы во всех компонентах экосистемы, в том числе в ихтиофауне [1–5]. Ихтиофауна является ключевым звеном, связывающим речные трофические сети с человеком и, следовательно, потенциальным переносчиком техногенных радионуклидов населению.

Радионуклиды могут поступать в организм рыб биоассимиляционным и адсорбционным путем [6]. Пищевой путь отмечается как основной для ассимиляции ^{137}Cs пресноводными рыбами [7, 8] в водоемах Чернобыльской зоны отчуждения. Однако ^{137}Cs может накапливаться в мышцах пресноводных рыб и из воды [9]. Удельные концентрации техногенных радионуклидов в воде р. Енисей после остановки прямоточных реакторов значительно снизились [10, 11]. Поэтому можно полагать, что пищевой путь поступления радионуклидов в организмы енисейских рыб в период работы

последнего реактора на ГХК был основным. Исследования, проведенные после остановки прямоточных реакторов на ГХК, выявили техногенные изотопы в телах рыб [2–5, 12], в том числе выловленных выше сбросов ГХК [12]. Значительные активности техногенных радионуклидов зарегистрированы в низших звеньях пищевых цепей, ведущих к рыбе, в макрофитах [13, 14] и отдельных представителях зообентоса [15].

В числе промысловых видов рыб, обитающих на участке среднего Енисея вблизи ГХК, находятся виды с разными типами питания, в том числе бентофаги (елец, хариус) и ихтиофаги (щука, налим) [16]. Цель работы – оценить эффективность переноса техногенных радионуклидов в организмы рыб на разных уровнях трофической сети.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Представителей трофических сетей р. Енисей отбирали на участке, расположенном на расстоянии 5–10 км от ГХК, в сентябре и октябре 2009 и 2010 гг. и в мае 2010 г. Из

ихтиофауны Енисея для исследования использовали хищных рыб – щуку (*Esox lucius* L.) и налима (*Lota lota* L.) и рыб-бентофагов – ельца (*Leuciscus leuciscus baicalensis* Dub.) и хариуса (*Thymallus arcticus* P.). Рыб отлавливали сетями и замораживали. Перед подготовкой проб к измерениям определяли биологические показатели рыб (абсолютную длину тела, массу, возраст) стандартными методами [17]. Выборки рыб, использованные в работе, представлены преимущественно половозрелыми особями. Всего проанализировали 45 экз. хариуса, 51 экз. ельца, одну щуку и одного налима. Для одной пробы использовали по 6–11 экз. ельцов и хариусов. Полная длина (мм) одной особи хариуса 124–295, ельца – 160–122, щуки – 509, налима – 350. Сырая масса (г) хариуса составляла 42 – 348, ельца – 46–93, щуки – 1054, налима – 620. Возраст хариусов составлял 2+, ельцов – 3+, щуки и налима – 4+ г.

Из представителей зообентоса использовали бокоплавов (*Philolimnogammarus viridis* Dub. и *Ph. cyaneus* Dub.), которые входят в спектр питания сибирского хариуса [18]. Бокоплавов собирали с биомассы водного мха, затем отделяли от других видов зообентоса и мусора. По видам бокоплавов не сортировали. Водный мох (*Fontinalis anti-pyretica* Hedw), вегетирующий на камнях на дне реки, собирали с глубины около 1,5 м на проточном участке при помощи модифицированных садовых грабель.

Пробы фитомассы и зообентоса многократно промывали водопроводной водой и сушили сначала на воздухе, затем в сушильном шкафу при 80 °С до постоянной массы. Соотношения сырой и сухой массы определяли экспериментально. Тела рыб разбирали на органы и ткани, как описано нами ранее [5], которые озоляли в смеси перекиси водорода (30 %) и азотной кислоты и затем концентрировали до 100 мл. В данной работе рассматриваются мышечные ткани (без учета мышц головы) и все тело рыбы, включая мышцы.

Содержание радионуклидов в пробах биоты измеряли на гамма-спектрометре со сверхчистым германиевым детектором (Canberra, США), спектры анализировали с помощью программного обеспечения Genie-2000 (Canberra, США). Значения активности корректировали на дату отбора проб. Удельные

активности радионуклидов в пробах приведены в Бк/кг сырой массы. Коэффициенты переноса (КП) рассчитывали как отношение удельной активности радионуклидов в биомассе консумента к удельной активности в биомассе его пищевого объекта, коэффициенты накопления (КН) радионуклидов из воды считали как отношение удельной активности в биомассе к удельной активности в воде.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Удельные активности радионуклидов в компонентах трофических сетей. Во всех пробах биоты зарегистрирован природный изотоп калия (^{40}K), который имел наибольшую удельную активность по сравнению с техногенными гамма-излучающими радионуклидами (табл. 1, 2). Из природных радионуклидов в отдельных пробах регистрировались также изотопы свинца и висмута. В биомассе водного мха перечень техногенных радионуклидов был самым большим. В частности, отмечены изотопы с наведенной активностью: ^{24}Na , ^{46}Sc , ^{51}Cr , ^{54}Mn , $^{58,60}\text{Co}$, ^{65}Zn , $^{152,154}\text{Eu}$, ^{239}Np и продукты ядерного деления: $^{141,144}\text{Ce}$, ^{137}Cs . В период работы реакторного производства наблюдалась высокая активность короткоживущих изотопов ^{24}Na , ^{51}Cr и ^{239}Np в пробах мха (см. табл. 1). Водный мох является средой обитания некоторых представителей зообентоса, в частности бокоплава, который может питаться эпифитными микроорганизмами, населяющими мох, а также самим мхом [19].

В зообентосе вблизи ГХК доминирующее положение занимают амфиподы: массовым видом является бокоплав *Ph. viridis* [20]. В пробах бокоплавов регистрировались радиоактивные изотопы кобальта, цинка и цезия. Наиболее значительная удельная активность была у цинка (см. табл. 1).

В телах рыб и пробах мышц наиболее часто регистрировались ^{65}Zn и ^{137}Cs , реже – ^{60}Co (см. табл. 1, 2). В пробах щуки обнаружили также природные изотопы свинца и висмута (см. табл. 2). Удельная активность калия в мышцах всех видов рыб была выше, чем в целых телах, а цезия в мышцах превышала таковую в телах только рыб-ихтиофагов (см. табл. 2). Следует отметить, что

Удельная активность радионуклидов (Бк/кг сырой массы) в пробах бокоплава, хариуса и ельца р. Енисей в сентябре и октябре 2009 г.

Изотоп	Бокоплав				Хариус				Елец			
	Сентябрь		Октябрь		Сентябрь		Октябрь		Сентябрь		Октябрь	
	Все тело	Мышцы	Все тело	Мышцы	Все тело	Мышцы	Все тело	Мышцы	Все тело	Мышцы	Все тело	Мышцы
²⁴ Na	236 ± 48	—*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
⁴⁰ K	60 ± 3	27 ± 9	40 ± 4	127 ± 8	151 ± 8	120 ± 7	110 ± 6	81 ± 7	84 ± 5	84 ± 7	122 ± 8	—
⁴⁶ Sc	0,90 ± 0,04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
⁵¹ Cr	15,8 ± 0,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
⁵⁴ Mn	1,4 ± 0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
⁵⁸ Co	1,2 ± 0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
⁶⁰ Co	17,8 ± 0,4	5,1 ± 0,4	2,5 ± 0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
⁶⁵ Zn	2,2 ± 0,1	5,8 ± 0,8	7,4 ± 0,4	2,3 ± 0,4	0,8 ± 0,3	3,3 ± 0,4	0,8 ± 0,2	2,6 ± 0,5	—	1,4 ± 0,3	—	—
¹³⁷ Cs	5,6 ± 0,2	1,7 ± 0,4	2,0 ± 0,3	0,4 ± 0,1	0,5 ± 0,1	1,3 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,6 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,9 ± 0,1	—
¹⁴¹ Ce	0,40 ± 0,05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
¹⁴⁴ Ce	1,3 ± 0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
¹⁵² Eu	1,9 ± 0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
¹⁵⁴ Eu	0,35 ± 0,05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
²¹⁰ Pb	45 ± 3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
²¹⁴ Bi	1,7 ± 0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
²¹⁴ Pb	2,2 ± 0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
²³⁹ Np	15 ± 1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Прочерк здесь и в табл. 2 — отсутствие радионуклида в пробе.

Удельная активность радионуклидов (Бк/кг сырой массы) в пробах хариуса, ельца, налима и щуки р. Енисей (май 2010 г.)

Изотоп	Хариус		Елец		Щука		Налим	
	Все тело	Мышцы	Все тело	Мышцы	Все тело	Мышцы	Все тело	Мышцы
⁴⁰ K	137 ± 12	146 ± 8	89 ± 10	115 ± 8	100 ± 8	119 ± 7	85 ± 8	115 ± 6
⁶⁰ Co	-	-	0,17 ± 0,07	-	-	-	0,51 ± 0,08	0,27 ± 0,08
⁶⁵ Zn	2,7 ± 0,5	-	3,6 ± 0,8	1,3 ± 0,2	1,4 ± 0,3	-	0,38 ± 0,08	-
¹³⁷ Cs	0,8 ± 0,2	0,5 ± 0,1	1,1 ± 0,3	1,0 ± 0,2	1,9 ± 0,1	2,3 ± 0,1	0,43 ± 0,05	0,9 ± 0,1
²¹² Pb	-	-	-	-	0,31 ± 0,04	-	-	-
²¹⁴ Pb	-	-	-	-	0,53 ± 0,08	0,41 ± 0,07	-	-

удельная активность техногенных радионуклидов в биомассе мха, бокоплава, а также в мышцах ельца и хариуса, отловленных после остановки последнего реактора на ГХК (в сентябре и октябре 2010 г., данные не представлены), не отличалась существенно от удельной активности в аналогичных пробах тех же видов гидробионтов, отловленных в период работы реакторного производства (в сентябре и октябре 2009 г.).

Многие исследователи отмечают зависимость накопления ¹³⁷Cs в мышцах рыб от типа их питания и положения в трофической сети [6, 21–23]. Существует тенденция увеличения удельной активности ¹³⁷Cs в мышцах рыб высших трофических уровней. В нашей работе самое высокое значение удельной активности цезия получено для мышц щуки (см. табл. 2). Основные депозиты ¹³⁷Cs в организмах рыб находятся в мышцах [22, 24], что также показано нами ранее для рыб р. Енисей [4].

Исследованные нами виды ихтиофауны служат объектами промысла для населения в течение всего года, поэтому накопление техногенных радионуклидов в съедобных частях тел (в мышцах и икре) создает определенную вероятность их трофического переноса человеку. Активность ¹³⁷Cs в мышцах рассмотренных нами четырех видов рыб (см. табл. 1, 2) была значительно меньше предельно допустимых уровней для рыбной продукции (130 Бк/кг), принятых в России (СанПиН 2.3.2.1078-01). Во время работы прямоточных реакторов в 1990–91 г. удельная активность ¹³⁷Cs в мышцах рыб Енисея достигала 40 Бк/кг [1], что также не превышает установленную норму.

Эффективность накопления радионуклидов на разных трофических уровнях. Измеренная нами удельная активность радионуклидов в пробах биоты использована для расчета КП радионуклидов между компонентами трех трофических уровней: 1) из водного мха в зообентос (тела бокоплавов); 2) из зообентоса в тела и мышцы рыб-бентофагов (хариуса и ельца); 3) из тел рыб-бентофагов в тела и мышцы рыб-ихтиофагов (щуки и налима). Оценены и КН радионуклидов в биомассе водного мха из воды с использованием данных по удельной активности кобальта, цинка и цезия в воде во время работы

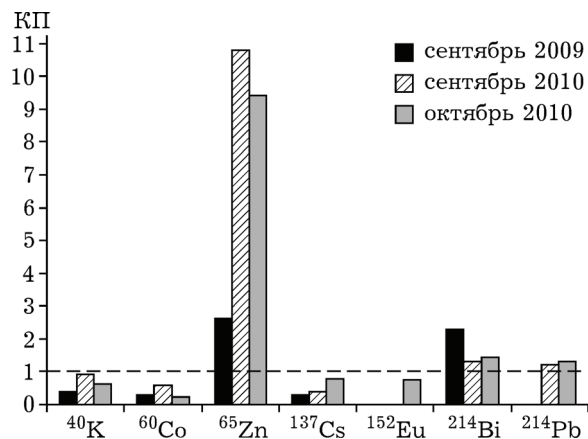


Рис. 1. Коэффициенты перехода радионуклидов в биомассу бочкоплавов из водного мха, рассчитанные для проб, отобранных в сентябре и октябре 2009 и 2010 гг.

последнего реактора на ГХК [11]. Согласно принятой в гидробиологии терминологии, в случае, когда величина КП (или КН) превышает единицу, можно говорить о накоплении радионуклида консументом, если величина КП меньше единицы, накопления радионуклида не происходит.

Величины КН из воды в биомассу водного мха составили 3600 для ^{60}Co , 730 – для ^{65}Zn и 50 – для ^{137}Cs . Таким образом, накопление радиоактивного кобальта макрофитами было более эффективным, чем цинка и цезия.

Для трофической пары водный мох – бочкоплав получены высокие величины КП ^{65}Zn (2,6–10,8). Следовательно, возможно трофическое накопление этого радионуклида бочкоплавом из биомассы самого мха или его эпифитов (рис. 1). Величины КП техногенных изотопов кобальта, цезия и европия не достигали единицы, как и природного изотопа калия. Величины КП природных изотопов висмута и свинца превышали единицу в 1,3–2,3 и в 1,2–1,3 раза соответственно, что также свидетельствует о возможности накопления этих радионуклидов.

Эффективность перехода радионуклидов из биомассы бочкоплавов в тела и мышцы рыб-бентофагов рассчитана для проб, отобранных в осенний период, когда бочкоплав доминирует в спектре питания хариуса [18]. Мы предположили, что спектры питания ельца и хариуса близких размерно-возрастных групп существенно не различаются. Значения КП

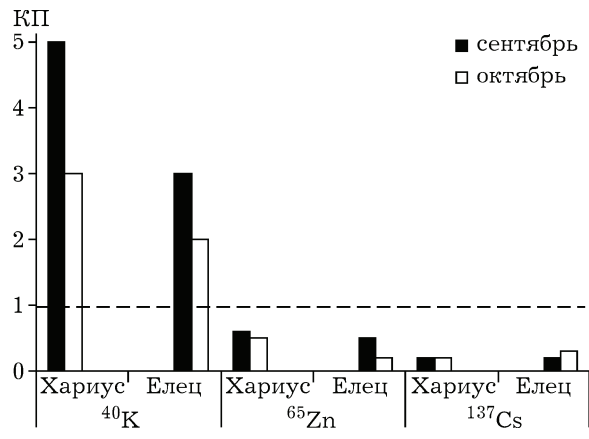


Рис. 2. Коэффициенты перехода радионуклидов в тела хариуса и ельца из биомассы бочкоплавов, рассчитанные для проб, полученных в сентябре и октябре 2009 г.

^{40}K из бочкоплага в тела хариуса и ельца находились в диапазоне от 2 до 5 (рис. 2). Величины КП ^{40}K из бочкоплавов в мышцы бентофагов варьировали от 2,7 до 6, составляя в среднем 4,3 для хариуса и 3,4 для ельца (рис. 3). Таким образом, величины КП природного изотопа ^{40}K из биомассы бочкоплага в биомассу рыб-бентофагов значительно превышают единицу, что свидетельствует о накоплении этого элемента как в целых телах, так и в мышцах рыб и согласуется с данными, полученными для стабильного калия [25]. Величины КП техногенных радионуклидов из биомассы бочкоплага в тела хариусов и ель-

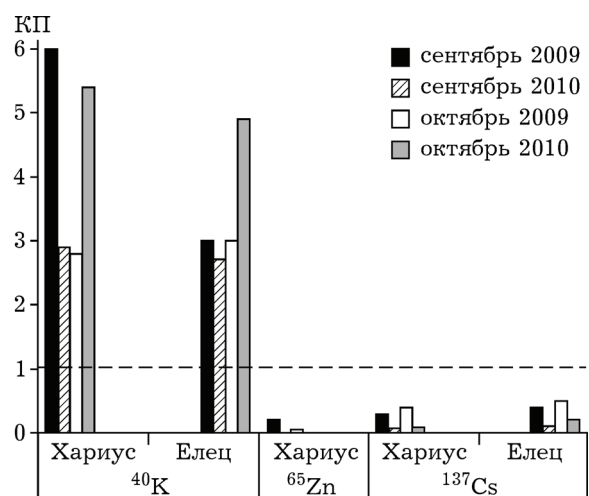


Рис. 3. Коэффициенты перехода радионуклидов в мышцы хариуса и ельца из биомассы бочкоплага, рассчитанные для проб, отобранных в сентябре и октябре 2009 и 2010 гг.

цов были меньше единицы – в диапазоне 0,2–0,6 для цинка и 0,2–0,7 для цезия (см. рис. 2). Диапазоны варьирования величин КП цинка и цезия в мышцы хариуса и ельца из зообентоса начинались от еще меньших величин и не превышали 0,5 (см. рис. 3). Следовательно, между трофическими уровнями зообентос – рыбы-бентофаги не происходит эффективного переноса техногенных радионуклидов цинка и цезия. Цезий традиционно рассматривается в радиоэкологии как аналог калия, однако эффективность трофического переноса этих элементов к рыбам-бентофагам р. Енисей существенно различается.

Для оценки эффективности переноса радионуклидов рыбам-ихтиофагам рассчитаны КП в трофических парах тело хариуса или ельца – щука или налим (тело и мышцы) (рис. 4). Величины КП ^{40}K в этих трофических парах варьировали от 0,6 до 1,3, т. е. близки к единице. Величины КП ^{65}Zn в тела и мышцы рыб-ихтиофагов были значительно ниже единицы, что свидетельствует об отсутствии накопления этого изотопа хищными рыбами из рассмотренных пищевых объектов. Величина КП ^{60}Co из тел ельца в мышцы и тела налима существенно превысила единицу (1,6 и 3 соответственно), следовательно, этот радионуклид может накапливаться в телах налима из тел ельца. Величины КП ^{137}Cs из рыб-бентофагов в мышцы налима близки к единице (0,8–1,1), в тела налима – не превышали единицу (0,4–0,5). Перенос цезия в тела и мышцы щуки был более эффективным. Так, КП ^{137}Cs в мышцы щуки составили 2,1–2,9, а в тела – 1,7–2,4

(см. рис. 4). Таким образом, трофическое накопление цезия в мышцах рыб-ихтиофагов более эффективно, чем в телах. Из результатов также видно, что возможен эффективный трофический перенос цезия в тела и мышцы щуки из тел рыб-бентофагов, в отличие от налима. Ранее экспериментально установлено, что ^{137}Cs поступает в организм свободноживущих рыб-ихтиофагов преимущественно по трофическому пути при условии, если рыба полноценно питается [7]. В ряде работ отмечается повышенное удельное содержание цезия в мышцах рыб-ихтиофагов, в том числе щуки, по сравнению с рыбами более низких трофических уровней [6, 21–23], что все авторы связывают с типом питания. Таким образом, полученные нами результаты находят косвенное подтверждение в литературе.

В целом выявились значительные видовые отличия в накоплении радионуклидов рыбами-ихтиофагами из рассмотренных пищевых объектов. Сравнение величин КП калия на разных трофических уровнях показывает, что этот природный изотоп может накапливаться только в трофической паре зообентос – рыбы-бентофаги, цезий – только в трофической паре рыбы-бентофаги – щука, кобальт может эффективно накапливаться налимом из тел рыб-бентофагов.

Традиционно в радиоэкологии КП радионуклидов в тела рыб оцениваются относительно воды [26, 27]. В воде р. Енисей концентрация ^{137}Cs составляла в последние годы работы реакторного производства на ГХК 0,12 Бк/л, ^{60}Co – 0,005, ^{65}Zn – 0,003 Бк/л [11].

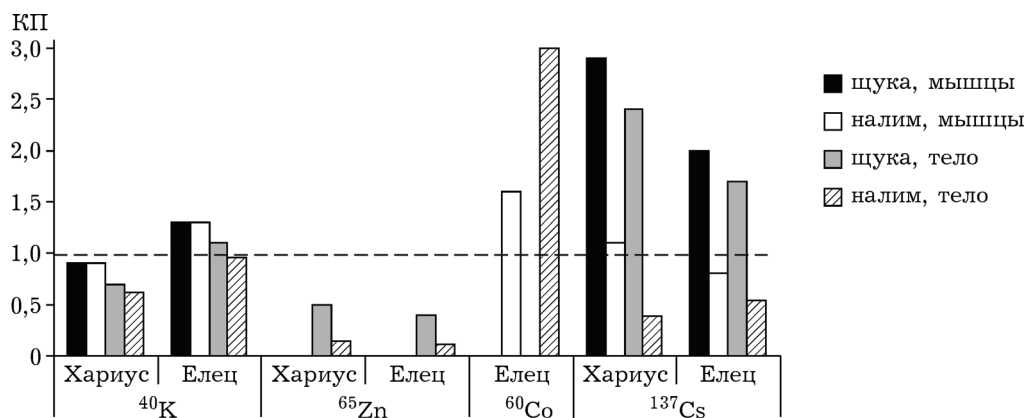


Рис. 4. Коэффициенты перехода радионуклидов из тел хариуса и ельца в мышцы щуки и налима, рассчитанные для проб, полученных в мае 2010 г.

Величины КП этих изотопов в тела и мышцы всех четырех видов рыб из воды находились в диапазоне 2–19 для цезия, 34–102 – для кобальта и 127–1200 – для цинка. Данные оценки совпадают с порядком аналогичных величин, приведенных в литературе [27]. Однако оцененные нами величины КП ^{137}Cs , ^{65}Zn и ^{60}Co из воды р. Енисей в тела и мышцы рыб значительно (на порядки) превышают коэффициенты трофического переноса этих радионуклидов в тела и мышцы рыб-бенто- и ихтиофагов (см. рис. 2–4). Очевидно, что при расчете КП радионуклидов в тела, а особенно в мышцы рыб из воды, учитываются далеко не все потоки техногенных радионуклидов, попавших в воду, и поэтому величины КП в данном случае являются завышенными, что и показала сделанная нами оценка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование показало, что эффективность переноса радионуклидов между компонентами разных уровней трофической сети р. Енисей значительно отличается. Наиболее эффективное накопление техногенных радионуклидов происходит из воды макрофитами (водным мхом): максимальный КП получен для ^{60}Co по сравнению с ^{65}Zn и ^{137}Cs . Эффективный трофический перенос из водного мха в зообентос (тела бокоплава) возможен для ^{65}Zn (КП = 2,6–10,8), в то время как величины КП ^{40}K , ^{60}Co и ^{137}Cs не превысили единицы. Между трофическими уровнями зообентос – рыбы-бентофаги возможен эффективный перенос только природного изотопа ^{40}K (КП = 3–6). Изотопы цинка и цезия в этой трофической паре не накапливаются (КП < 0,6). Выявились значительные видовые отличия в накоплении радионуклидов рыбами-ихтиофагами из рыб-бентофагов. Наиболее эффективный трофический перенос ^{137}Cs возможен в тела и мышцы щуки (КП = 1,7–2,9). В целом трофическое накопление цезия в мышцах обоих видов хищных рыб (налима и щуки) оказалось более эффективным, чем в телах. Также возможен эффективный трофический перенос ^{60}Co в тела и мышцы налима (КП = 3,0 и 1,6 соответственно).

Работа поддержана грантом РФФИ (№ 12-04-00539-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Носов А. В., Ашанин М. В., Иванов А. Б., Мартынова А. М. Радиоактивное загрязнение р. Енисей, обусловленное сбросами Красноярского горно-химического комбината // Атомная энергия. 1993. Т. 74, № 2. С. 144–150.
2. Носов А. В., Мартынова А. М. Анализ радиационной обстановки на р. Енисее после снятия с эксплуатации прямоточных реакторов Красноярского ГХК // Там же. 1996. Т. 81, № 3. С. 226–232.
3. Вакуловский С. М., Крышев А. И., Тертышник Э. Г., Чумичев В. Б., Шишлов А. Е., Савицкий Ю. В., Кудинов В. Г. Накопление ^{32}P в рыбе Енисея и реконструкция дозы облучения населения // Там же. 2004. Т. 97, № 1. С. 61–67.
4. Зотина Т. А., Трофимова Е. А., Каглян А. Е., Болсуновский А. Я., Гудков Д. И. Распределение техногенных радионуклидов в организмах рыб из р. Енисей (Россия) и водоемов зоны отчуждения Чернобыльской АЭС (Украина) // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. 2010. № 1 (12). С. 91–94.
5. Zotina T. A., Trofimova E. A., Bolsunovsky A. Ya. Artificial radionuclides in fish fauna of the Yenisei River in the vicinity of the Mining-and-Chemical Combine (Siberia, Russia) // Radioprotection. 2011. Vol. 46, N 6. P. 75–78.
6. Рябов И. Н. Радиоэкология рыб водоемов в зоне влияния аварии на Чернобыльской АЭС. М.: Тов-во научных изданий КМК, 2004. 215 с.
7. Зарубин О. Л. Количественные характеристики путей поступления ^{137}Cs в организм карпа и канального сома в водоеме-охладителе Чернобыльской АЭС // Гидробиол. журн. 2006. Т. 42, № 3. С. 74–80.
8. Беляев В. В., Волкова Е. Н. Оценка поступления ^{137}Cs с водными массами в организм пресноводных рыб // Там же. 2007. Т. 43, № 3. С. 112–116.
9. Malek M. A. Uptake and elimination of ^{137}Cs by climbing perch (*Anabus testudineus*) // Health. physics. 1999. Vol. 77, N 6. P. 719 – 723.
10. Вакуловский С. М., Тертышник Э. Г., Кабанов А. И. Перенос радионуклидов в р. Енисей // Атомная энергия. 2008. Т. 105, № 5. С. 285–291.
11. Бондарева Л. Г., Болсуновский А. Я., Трапезников А. В., Дегерменджи А. Г. Использование новой методики концентрирования трансурановых элементов в пробах воды реки Енисей // Докл. АН. 2008. Т. 23, № 4. С. 479–482.
12. Паньков Е. В., Болсуновский А. Я., Пименов А. В., Суковатый А. Г. Содержание радионуклидов и мощности доз облучения в отдельных видах ихтиофауны реки Енисей // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде: мат-лы IV Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. Е. Б. Сыдыкова, М. С. Панина. Семипалатинск: Семипалатинский гос. пед. ин-т, 2006. Т. 1. С. 356–360.
13. Bolsunovsky A. Artificial radionuclides in aquatic plants of the Yenisei River in the area affected by effluents of Russian plutonium complex // Aquat. ecol. 2004. Vol. 38. P. 57 – 62.

14. Зотина Т. А. Распределение техногенных радионуклидов в биомассе макрофитов реки Енисей // Радиационная биология. Радиоэкология. 2009. Т. 49, № 6. С. 729–737.
15. 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.
16. Попов П. А. Рыбы Сибири: распространение, экология, вылов. Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2007. 526 с.
17. Вышегородцев А. А., Скопцова Г. Н., Чупров С. М., Зуев И. В. Практикум по ихтиологии: Учеб. пособие. Красноярск, 2002. 127 с.
18. Зуев И. В., Семенова Е. М., Шулепина С. П., Резник К. А., Трофимова Е. А., Шадрин Е. Н., Зотина Т. А. Питание хариуса *Tymallus* sp. в среднем течении р. Енисей // Журнал СФУ. 2011. Т. 4, № 3. С. 15–19.
19. Kalacheva G. S., Gladyshev M. I., Suschik N. N., Makhutova O. N. Water moss as a food item of the zoobenthos in the Yenisei River // Cent. Eur. J. Biol. 2011. Vol. 6, N 2. P. 236–245.
20. Гладышев М. И., Москвичева А. В. Байкальские всееленцы заняли доминирующее положение в бентофауне верхнего Енисея // Докл. АН. 2002. Т. 383, № 4. С. 568–570.
21. Зарубин О. Л. Накопление ^{137}Cs сомом обыкновенным (*Silurus glanis* L.) в водоемах Киевской области после аварии на Чернобыльской АЭС // Гидробиол. журн. 2008. Т. 44, № 1. С. 91–104.
22. Гудков Д. И., Каглян А. Е., Назаров А. Б., Кленус В. Г. Динамика содержания и распределение основных дозообразующих радионуклидов у рыб зоны отчуждения Чернобыльской АЭС // Там же. 2008. Т. 44, № 3. С. 95 – 113.
23. Зарубин О. Л., Малюк И. А., Костюк В. А. Особенности содержания ^{137}Cs у различных видов рыб Каневского водохранилища на современном этапе // Там же. 2009. Т. 45, № 5. С. 110 – 116.
24. Каглян А. Е., Гудков Д. И., Кленус В. Г., Широкая О. З., Назаров А. Б., Беляев В. В., Ткаченко В. А. Оценка уровней накопления ^{137}Cs рыбами-ихтиофагами водоемов левобережной поймы р. Припять (зона отчуждения Чернобыльской АЭС) // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: мат-лы III Междунар. конф. Томск, 2009. С. 229–231.
25. Анищенко О. В., Гладышев М. И., Кравчук Е. С., Суцник Н. Н., Грибовская И. В. Распределение и миграция металлов в трофических цепях экосистемы реки Енисей в районе г. Красноярск // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 5. С. 623–632.
26. Куликов Н. В., Чеботина М. Я. Радиоэкология пресноводных биосистем. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. 129 с.
27. Fesenko S., Fesenko J., Sanzharova N., Karpenko E., Titov I. Radionuclide transfer to freshwater biota species: review of Russian language studies // J. Env. Rad. 2011. Vol. 102. P. 8–25.

Estimation of the Transfer of Technogenic Radionuclides in the Food Chains of the Enisey River

E. A. TROFIMOVA, T. A. ZOTINA, A. Ya. BOLSUNOVSKIY

*Institute of Biophysics SB RAS
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok
E-mail: t_zotina@ibp.ru*

Efficiency of the transfer of gamma-emitting radionuclides in food chains including macrophytes, zoobenthos, fish benthos- and ichthyophages was estimated at the radiation-polluted region of the Enisey river. Essential differences in the efficiency of the transfer of natural and technogenic radionuclides between the components of different trophic levels were revealed. Substantial species-related differences in the accumulation of radionuclides in ichthyophage fish from food were revealed.

Key words: water moss, zoobenthos, grayling, dace, pike, eelpout.