

Радиационно-гигиеническая оценка содержания и распределения ^{90}Sr и ^{137}Cs в ихтиофауне Обь-Иртышской речной системы

А.В. Трапезников, В.Н. Николкин, А.В. Коржавин, В.Н. Трапезникова

Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Целью настоящей работы является радиационно-гигиеническая оценка содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в рыбе Обь-Иртышской речной системы и изучение основных закономерностей накопления радионуклидов в ихтиофауне этих рек. Для выполнения данной задачи были использованы многолетние результаты радиоэкологических исследований рыбы из рек Теча, Иртыш и Обь за период 2004–2016 гг. Выполнена оценка рыбы как пищевого продукта по двум критериям: а) допустимые уровни удельной активности радионуклидов (СанПиН 2.3.2.1078-01); б) с использованием показателя соответствия V и неопределенности его определения ΔV (ГОСТ 32161-2013 и ГОСТ 32163-2013). Показано, что более высокое содержание радионуклидов наблюдается в ихтиофауне реки Теча (1379,1 Бк/кг по ^{90}Sr и 41,9 Бк/кг по ^{137}Cs). На реках Обь и Иртыш средние показатели удельной активности радионуклидов в рыбе были существенно ниже и слабо изменялись на протяжении обследованного участка: для ^{90}Sr в диапазоне 6,0–8,1 Бк/кг (среднее 6,8), для ^{137}Cs – 0,6–1,9 Бк/кг (среднее 1,3). Оценка на соответствие критериям радиационной безопасности с использованием показателя соответствия V и его неопределенности ΔV ($V+\Delta V$) подтвердила непригодность использования в пищевых целях по радиационному фактору всех исследованных видов рыб из р. Течи ($45-55 > 1$). Рыба из всех остальных исследованных участков Обь-Иртышской речной системы может быть использована в пищу без ограничений ($0,06-0,53 < 1$). Закономерности распределения ^{90}Sr и ^{137}Cs в ихтиофауне Обь-Иртышской речной системы на участке протяженностью 2400 км представлены в виде эмпирических регрессионных моделей. Модели описывают резкое снижение удельной активности радионуклидов в рыбе на участке рек Теча – Исеть на два порядка величин по ^{90}Sr (с 2000 до 20 Бк/кг) и на один порядок по ^{137}Cs (с 40 до 2 Бк/кг). С высокой степенью достоверности ($R^2 > 0,86$ для ^{90}Sr и $R^2 > 0,92$ для ^{137}Cs) показано наличие степенных зависимостей между содержанием радионуклидов в ихтиофауне и их содержанием в воде, с адекватностью, подтвержденной критериями Фишера. Это может быть использовано для предварительной оценки уровня содержания радионуклидов в рыбе на основе результатов измерений среднегодовых концентраций этих радионуклидов в воде.

Ключевые слова: Обь-Иртышская речная система, ихтиофауна, техногенные радионуклиды, санитарно-гигиеническая оценка, эмпирические модели распределения.

Введение

Широкомасштабное радиоактивное загрязнение небольшой реки Теча, расположенной в Челябинской и Курганской областях и относящейся к бассейну Обь-Иртышской речной системы, произошло в 1949–1951 гг. в ходе прямой утилизации в открытую речную систему жидких технологических отходов и аварийных сбросов с завода по переработке оружейного плутония [1–3]. Вода, донные отложения, пойма и биота реки в течение короткого времени оказались загрязнены техногенными радионуклидами до экстремально высоких уровней. Согласно [2], в Течу поступило 76 млн м³ отходов с суммарной активностью 100 ПБк. Часть этой активности была аккумулярована в пойме и донных отложениях Течи, другая часть транзитом прошла дальше, поступив в гидрографическую систему рек Исеть – Тобол – Иртыш – Обь [4].

В бассейне реки Обь и ее притока реки Тоть в Томской области находится территория, загрязненная после радиационной аварии на Сибирском химкомбинате в 1993 г. На территории комбината расположены хранилища жидких и твердых радиоактивных отходов. В открытых бассейнах находится 4,6 ЭБк, а в подземных пластах на глубине до 300 м закачано 15 ЭБк жидких радиоактивных отходов [5, 6].

Вся территория Северного Урала, включая обширную заболоченную пойму Нижней Оби, находилась в зоне воздействия атмосферных выпадений продуктов деления урана и плутония, образовавшихся при испытаниях в 1950–1960-х гг. ядерного оружия на полигоне Новая Земля [6, 7].

Степень влияния отдельных факторов на общую картину радиоактивного загрязнения Обь-Иртышской реч-

Трапезников Александр Викторович

Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук

Адрес для переписки: 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202; E-mail: vera_zar@mail.ru

ной системы остается недостаточно изученной и требует постоянного мониторинга. Установлено, что годовой сток ^{90}Sr и ^{137}Cs с водой, поступающей в речную систему на территории Ханты-Мансийского автономного округа со стороны Оби, более чем в два раза превышает годовой сток, поступающий со стороны Иртыша [8, 9].

В результате указанных радиационных инцидентов сложилась ситуация, когда в пределах одной сообщаемой пресноводной экосистемы существуют участки с ограниченной возможностью использования речных биоресурсов по радиационному фактору и регионы с развитым промысловым рыболовством. Для населения севера, проживающего на берегах Обь-Иртышской речной системы, местная рыба является одним из традиционных продуктов питания, входящих в ежедневный рацион, поэтому мониторинг содержания в рыбе техногенных радионуклидов является крайне актуальной задачей. С другой стороны, являясь элементом биоты, ихтиофауна тесно связана с процессами биоаккумуляции радионуклидов из водной среды, вследствие чего при проведении экологических исследований водных экосистем рыб часто рассматривают в качестве биоиндикатора техногенных загрязнений [8, 10–16]. Наиболее важными из радиоактивных загрязнителей являются долгоживущие радионуклиды, включая ^{90}Sr и ^{137}Cs , содержание которых в рыбе как пищевом продукте регламентируется санитарными нормами практически всех развитых государств.

Приведенные в настоящей работе результаты исследований охватывают период с 2004 по 2016 г. За это время было накоплено большое количество материала о содержании долгоживущих радионуклидов в рыбе Обь-Иртышского речного бассейна, частично представленного в работах [11, 17, 18]. В данной работе впервые предпринята попытка систематизировать разрозненные материалы о распределении долгоживущих радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs в ихтиофауне Обь-Иртышской системы на протяжении более 2400 км от р. Теча до Нижней Оби, полученные авторами в различные периоды времени.

Цель исследования – радиационно-гигиеническая оценка рыбы Обь-Иртышской речной системы как пищевого продукта на соответствие критериям радиационной безопасности. Изучение основных закономерностей распределения и накопления техногенных радионуклидов в ихтиофауне Обь-Иртышской речной системы.

Задачи исследования:

- обработка многолетних результатов исследований содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в рыбе Обь-Иртышской системы;
- оценка уровней загрязнения рыбы техногенными радионуклидами согласно действующим санитарно-гигиеническим нормативам;
- построение эмпирических моделей, характеризующих распределение ^{90}Sr и ^{137}Cs в ихтиофауне Обь-Иртышской системы на протяжении 2400 км;
- выявление основных закономерностей накопления радионуклидов ихтиофауной в зависимости от их содержания в воде.

Материалы и методы

Отбор проб ихтиофауны из Обь-Иртышского речного бассейна осуществлялся в ходе выполнения много-

летних радиоэкологических экспедиций на реках Теча в Челябинской области, Иртыш и Обь в границах Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО) в период 2004–2012 гг. и реке Обь в районе г. Лабитнанги (2014–2016 гг.). Кроме рыбы, на указанных реках параллельно осуществлялся отбор проб воды и других компонентов водных экосистем. Точки отбора проб на реках показаны на рисунке 1. Створ Нижневартовск на реке Обь не относится непосредственно к части речной системы, подверженной воздействию радиоактивных загрязнений со стороны реки Теча, однако он отражает влияние Сибирского химкомбината, расположенного на площади водосбора реки Томь, являющейся притоком реки Обь.



Рис. 1. Схема отбора проб ихтиофауны на участках речной системы Теча – Исеть – Тобол – Иртыш – Обь
[Fig. 1.] The scheme of ichthyofauna sampling in the sites of the Techa – Iset – Tobol – Irtysh – Ob river system]

Для исследований отбирались как хищные, так и мирные виды рыб (всеядные, бентофаги). Дифференциация рыб по типу питания на хищных и мирных, принятая нами при обработке данных, относительно условна, поскольку известно, что многие виды рыб всеядны (*Squalius cephalus*, *Cyprinus carpio carpio*, *Tinca tinca*, *Carassius carassius*), мирные рыбы часто становятся хищниками при недостатке привычной пищи, а бентофаги легко переключаются на питание зоопланктоном.

Материал для исследований представлен следующими видами ихтиофауны:

- пыжьян – *Coregonus lavaretus pidschian* (Gmelin, 1789), возраст от 3 до 4 лет, питание: бентос;
- щокур (чир) – *Coregonus nasus Pallas*, возраст от 3 до 4 лет, питание: бентос, донные насекомые и моллюски.
- пелядь (сырок) – *Coregonus peled* (Gmelin, 1789), возраст от 2 до 3 лет, питание: зоопланктон;
- карась – *Carassius carassius* L., возраст от 2 до 3 лет, питание: бентос;
- пескарь – *Gobio gobio cynocephalus*; питание: бентос;
- лещ – *Abramis brama* L., питание: бентос;
- плотва – *Rutilus rutilus* L., питание: бентос;
- линь – *Tinca tinca* L., возраст от 5 до 7 лет, питание: всеядный, в зависимости от возраста (высшая растительность, моллюски, насекомые, мальки рыб);

– голавль – *Squalius cephalus*, питание: всеядный хищник, в рацион которого входят насекомые, черви, моллюски, раки, лягушки, икра и молодь рыб, упавшие в воду семена растений, плоды и ягоды;

– язь – *Leuciscus idus L.*, возраст от 5 до 7 лет, питание очень разнообразно в зависимости от возраста (высшая растительность, моллюски, насекомые, мальки рыб);

– щука – *Esox lucius L.*, возраст от 3 до 6 лет, питание: рыбоядный хищник, в рацион могут входить лягушки, мелкие млекопитающие и водоплавающая птица;

– налим – *Lota lota L.*, возраст от 3 до 5 лет, всеядный хищник;

– окунь – *Perca fluviatilis L.*, возраст от 2 до 3 лет, всеядный хищник;

– ерш – *Acerina cernua L.*, возраст от 2 до 3 лет, всеядный хищник;

– судак – *Stizostedion lucioperca*, возраст от 3 до 5 лет, рыбоядный хищник.

Консервацию отобранных проб проводили двумя способами: в экспедициях более раннего периода рыбу после удаления внутренностей засаливали (каждая проба в отдельной емкости), на более поздних этапах исследований – замораживали в морозильной камере до состояния глубокой заморозки. Для исследований отбирали, как правило, по три повторности каждого вида, масса каждой составляла около 3 кг.

В лабораторных условиях предварительную подготовку проб рыбы проводили согласно рекомендациям (ГОСТ 32161-2013¹, ГОСТ 32163-2013²) с использованием методов термического концентрирования. Для этого тушки рыб размораживали, подсушивали и подвергали озолению в муфельной печи при температуре 450°C до состояния однородного мелкодисперсного порошка. Взвешивание исследуемых образцов осуществляли при комнатной температуре до и после озоления. Содержание радионуклидов, определенное для озоленных проб, во всех случаях пересчитывали на сырую массу исследуемой рыбы.

Пробы воды отбирали в емкости из полимерного материала в двух повторностях по 120 л в каждой, подкисляли небольшим количеством азотной кислоты для предотвращения сорбции радионуклидов на стенках сосудов. В лабораторных условиях воду фильтровали от взвесей, выпаривали до сухого остатка, который далее прокаливали в муфельной печи при $t = 450^\circ \text{C}$ в течение 8 ч и окончательно растирали пестиком до мелкодисперсного порошка.

Содержание ¹³⁷Cs в подготовленных пробах измеряли по гамма-линии 661,2 кэВ на низкофономом полупроводниковом гамма-спектрометре DSPTC-jr («Ortec», США) с коаксиальной детекторной системой на основе высокочистого германия (HPGe) с эффективностью 40%, при нижнем пределе обнаружения 0,15 Бк/кг и ошибке измерения не более 10%.

Определение ⁹⁰Sr проводили после радиохимической обработки с выделением осадка оксалата стронция, его высушивания, прокаливания, взвешивания и измерения.

Методика определения ⁹⁰Sr основана на выщелачивании радионуклидов 6-нормальной соляной кислотой, выделении ⁹⁰Sr в форме оксалатов, радиометрического измерения полученных препаратов. Измерение β-активности проводилось на малофономой установке УМФ-2000 (НПО «Доза», Россия) с нижним пределом обнаружения 0,5 Бк/кг, статистической ошибкой измерения не более 10%.

Достоверность результатов достигалась параллельным исследованием всех образцов отобранного материала в 2–3 повторностях, а также представительно большой массой проб, набираемой из отдельных экземпляров одного вида рыб. Статистическая обработка результатов заключалась в определении среднеарифметического значения и стандартного отклонения среднего арифметического. Оценка значимости различий в статистических выборках проводилась с применением *t*-теста Стьюдента. Проверка адекватности полученных эмпирических моделей проводилась с использованием *F*-критерия Фишера $F = R^2 / [1 - R^2] \times [f_2 / f_1]$, где *R* – коэффициент корреляции, а *f*₁ и *f*₂ – число степеней свободы объясненной и необъясненной дисперсий.

Результаты и обсуждение

Результаты определения содержания ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в исследованных видах рыбы в реках Теча, Иртыш и Обь представлены на рисунках 2 и 3 в виде диаграмм, построенных с использованием средних величин удельной активности радионуклидов за весь период исследований для каждого вида рыб.

В таблице 1 представлены средние показатели за весь исследуемый период 2004–2016 гг., которые дополнительно сгруппированы в экспериментальные выборки по хищным и мирным видам рыб.

Средние показатели удельных активностей радионуклидов (см. табл. 1) в ихтиофауне Течи, рассчитанные по 11 видам рыб, оказались самыми высокими (1400 Бк/кг по ⁹⁰Sr и 42 Бк/кг по ¹³⁷Cs). Для хищных рыб содержание радионуклидов в среднем составило 2020 Бк/кг по ⁹⁰Sr и 98 Бк/кг по ¹³⁷Cs, для мирных рыб – 1140 и 25 Бк/кг соответственно. На других участках Оби и Иртыша средние показатели удельной активности радионуклидов в рыбе были существенно ниже и находились в пределах от 6,0 до 8,1 Бк/кг по ⁹⁰Sr (среднее 6,8 Бк/кг) и от 0,6 до 1,9 Бк/кг по ¹³⁷Cs (среднее 1,3 Бк/кг).

Проверка статистической значимости различий содержания радионуклидов в сгруппированных выборках с использованием *t*-критерия Стьюдента показала, что для всей, кроме Течи, Обь-Иртышской речной системы различия между хищниками и мирными рыбами статистически незначимы ($t < t_{\text{крит}}$ при уровне значимости 0,05). Следовательно, данными различиями можно пренебречь, а удельные активности радионуклидов в рассматриваемых группах рыб можно представить средними величинами для всего экспериментального массива.

Анализ полученных данных показывает, что способность к накоплению радионуклидов в организме хищных рыб по сравнению с мирными наиболее явно наблюдает-

¹ ГОСТ 32161-2013. Продукты пищевые. Метод определения содержания цезия Cs-137. М.: Стандартиформ, 2013. 6 с. [Foodstuff. Method of determination of content of Cs-137. Moscow, Standartinform, 2013, 6 p. (in Russ.)]

² ГОСТ 32163-2013. Продукты пищевые. Метод определения содержания стронция Sr-90. М.: Стандартиформ, 2013. 12 с. [Foodstuff. Method of determination of content of Sr-90. Moscow, Standartinform, 2013, 12 p. (in Russ.)]

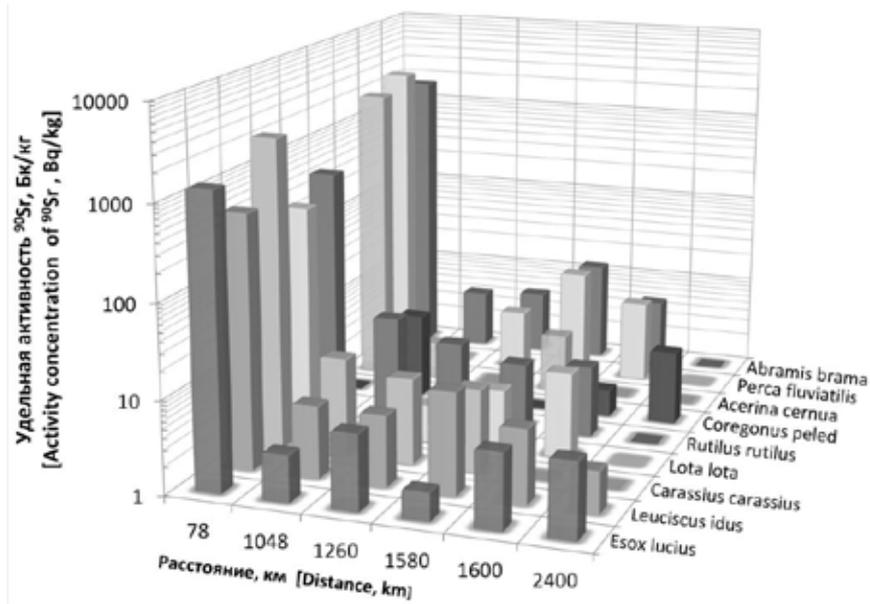


Рис. 2. Содержание ^{90}Sr в иктофауне Обь-Иртышской речной системы
 [Fig. 2. ^{90}Sr content in the ichthyofauna of the Ob-Irtysk river system]

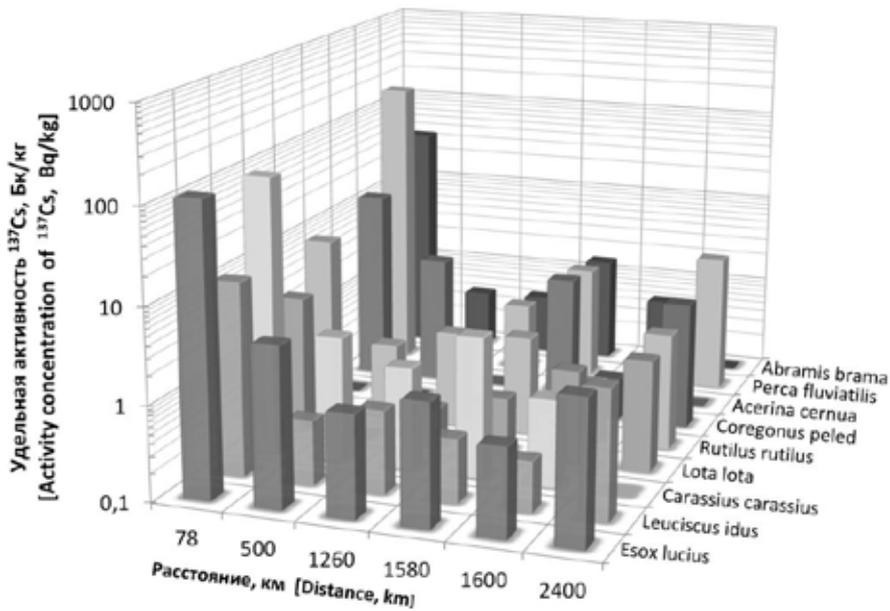


Рис. 3. Содержание ^{137}Cs в иктофауне Обь-Иртышской речной системы
 [Fig. 3. ^{137}Cs content in the ichthyofauna of the Ob-Irtysk river system]

Таблица 1

Средние значения величин удельной активности радионуклидов в иктофауне рек Теча, Иртыш и Обь, Бк/кг сыр. веса
 [Table 1
 Average values of radionuclides specific activity in the ichthyofauna of the Techa, Irtysk and Ob rivers, Bq/kg of wet weight]

Река / створ [River/site]	^{90}Sr			^{137}Cs		
	Среднее по всем видам [Average by all fish]	Среднее по хищным видам [Average by predatory fish]	Среднее по мирным видам [Average by peaceful fish]	Среднее по всем видам [Average by all fish]	Среднее по хищным видам [Average by predatory fish]	Среднее по мирным видам [Average by peaceful fish]
Теча / Муслиумово [Techa r./ Muslyumovo]	1400±880 n=11	2020±510 n=3	1100±710 n=8	42±36 n=11	98±54 n=3	25±17 n=8

Река / створ [River/site]	⁹⁰ Sr			¹³⁷ Cs		
	Среднее по всем видам [Average by all fish]	Среднее по хищным видам [Average by predatory fish]	Среднее по мирным видам [Average by peaceful fish]	Среднее по всем видам [Average by all fish]	Среднее по хищным видам [Average by predatory fish]	Среднее по мирным видам [Average by peaceful fish]
Иртыш / Демьянское [Irtysh r./ Demyanskoye]	6,0±2,0 n=7	5,2±2,3 n=3	6,7±1,4 n=4	0,9±0,3 n=7	1,0±0,2 n=3	0,9±0,3 n=4
Иртыш / Ханты-Мансийск [Irtysh r./ Khanty-Mansiysk]	8,1±4,5 n=9	7,3±5,9 n=4	9,5±3,1 n=5	1,5±0,8 n=9	1,8±0,2 n=4	1,3±1,0 n=5
Обь / Ханты-Мансийск [Ob r./ Khanty-Mansiysk]	6,0±1,9 n=7	7,6±0,9 n=2	4,9±1,7 n=5	0,6±0,3 n=7	0,8±0,02 n=2	0,4±0,1 n=5
Обь / Лабитнанги [Ob r./ Labytnangi]	6,9±4,7 n=9	5,6±3,5 n=3	7,5±5,1 n=6	1,9±0,8 n=9	3,2±0,2 n=3	1,5±0,5 n=6
Обь / Нижневартовск [Ob r./ Nizhnevartovsk]	7,0±3,7 n=7	2,9±0,3 n=2	8,6±3,2 n=5	1,9±1,6 n=7	3,7±1,2 n=2	0,9±0,7 n=5
Среднее по всем створам (кроме Течи) [The average of all sites (except the Techa r.)]	6,8±0,8	6,1±1,9	7,2±1,2	1,3±0,5	1,7±1,1	1,4±1,0

n – число видов в статистической выборке рыб в створе
[n – number of fish species in the statistical set].

ся в водных системах с более высокой концентрацией радионуклидов. Оценка значимости различий по *t*-критерию Стьюдента при уровне значимости 0,05 дала следующие величины: для ¹³⁷Cs (хищн./мирн.) $t_{эксп} = 2,32 > t_{крит} = 2,26$ (n-1 = 10), для ⁹⁰Sr (хищн./мирн.) $t_{эксп} = 2,29 > t_{крит} = 2,26$ (n-1 = 10), что позволяет сделать заключение о достоверном различии в накоплении радионуклидов в мирных и хищных видах рыбы реки Течи.

В соответствии с действующими в Российской Федерации гигиеническими требованиями СанПиН 2.3.2.1078-01³ допустимые уровни удельной активности ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в рыбе, используемой для пищевых целей, ограничиваются значениями в 100 и 130 Бк/кг соответственно. Приведенные выше данные свидетельствуют, что для всех видов рыб, обитающих в Тече, как хищных, так и мирных, указанные нормативные уровни значительно превышены и эта рыба непригодна для потребления в пищу. В ихтиофауне, ареал обитания которой находится за пределами Течи, превышение нормативных показателей по радионуклидам не зарегистрировано.

Определение соответствия исследованных видов рыб как пищевых продуктов критериям радиационной безопасности с использованием показателя соответствия *B* и неопределенности его определения ΔB проведено согласно требованиям ГОСТ 32161-2013 и ГОСТ 32163-

2013. Значения указанных параметров рассчитывались по следующим формулам:

$$B = \left(\frac{Q}{H} \right)_{Sr-90} + \left(\frac{Q}{H} \right)_{Cs-137} \quad (1)$$

$$\Delta B = \sqrt{\left(\frac{\Delta Q}{H} \right)_{Sr-90}^2 + \left(\frac{\Delta Q}{H} \right)_{Cs-137}^2} \quad (2)$$

где *Q* – измеренное значение удельной активности радионуклида в пробе;

H – допустимый уровень удельной активности радионуклида в испытуемом продукте (для ⁹⁰Sr – 100 Бк/кг, для ¹³⁷Cs – 130 Бк/кг);

ΔQ – абсолютная расширенная (при коэффициенте охвата *k*=2) неопределенность измерения удельной активности.

Рыба в качестве пищевого продукта признается соответствующей критерию радиационной безопасности, если $(B+\Delta B) \leq 1$. Результаты определения показателя соответствия критерию радиационной безопасности наиболее распространенных видов рыб приведены в таблице 2.

Из данных таблицы 2 следует, что показатели соответствия критерию радиационной безопасности $(B+\Delta B)$ превышают единичное значение только для ихтиофауны реки

³ Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов // Санитарно-эпидемиологические правила и нормы СанПиН 2.3.2.1078–01. М., 2001. С. 13–35. [Hygienic requirements of safety and nutritional value of food. Sanitary and epidemiological rules and regulations SanPiN 2.3.2.1078 – 01. Moscow, 2001, pp. 13-35. (in Russ.)]

Таблица 2

Определение показателя соответствия ($B+\Delta B$) критерию радиационной безопасности некоторых промысловых видов рыб [Table 2]

Determination of the indicator of compliance ($B+\Delta B$) to the radiation safety criterion for some commercial fish species

Река/створ	Вид рыбы	Q_{Cs-137} Бк/кг	Q_{Sr-90} Бк/кг	ΔQ_{Cs-137}	ΔQ_{Sr-90}	B	ΔB	$B+\Delta B$
River/site	[Fish species]	[Bq/kg]	[Bq/kg]					
Иртыш / Ханты-Мансийск [Irtysh Riv. / Khanty-Mansiysk]	Язь [Ide]	0,5	12,4	0,3	11,8	0,13	0,24	0,37 < 1
	Лещ [Bream]	1,4	12,7	0,5	10,6	0,14	0,21	0,35 < 1
	Налим [Burbot]	0,4	4,6	0,1	2,5	0,05	0,05	0,10 < 1
	Плотва [Roach]	1,1	5,3	1,34	2,5	0,06	0,05	0,11 < 1
	Карась [Crucian]	3,1	7,8	2,4	4,8	0,1	0,1	0,20 < 1
	Щука [Pike]	1,9	2	1,2	0,9	0,03	0,03	0,06 < 1
	Окунь [Perch]	1,7	15,5	1,8	18,2	0,17	0,36	0,53 < 1
	Ерш [Ruff]	2,1	4,4	0,9	3	0,06	0,06	0,12 < 1
Иртыш / Демьянское [Irtysh Riv./ Demyanskoye]	Язь [Ide]	0,7	5,8	0,3	2,6	0,06	0,05	0,11 < 1
	Карась [Crucian]	1,2	8,4	0,5	3,8	0,09	0,08	0,17 < 1
	Лещ [Bream]	0,4	5	0,2	2,7	0,06	0,05	0,11 < 1
	Плотва [Roach]	1,1	7,6	0,5	1,7	0,08	0,03	0,11 < 1
	Щука [Pike]	1,2	6,5	0,2	2,2	0,07	0,04	0,11 < 1
	Окунь [Perch]	0,9	7,1	0,3	2,2	0,08	0,04	0,12 < 1
	Язь [Ide]	0,5	6	0,1	2,1	0,07	0,04	0,11 < 1
	Карась [Crucian]	2,2	11,7	3,1	11,1	0,1	0,23	0,36 < 1
Обь / Нижневартовск [Ob Riv./ Nizhnevartovsk]	Лещ [Bream]	0,4	4,4	0,3	2	0,05	0,04	0,09 < 1
	Плотва [Roach]	0,7	12,6	0,3	8,1	0,1	0,16	0,29 < 1
	Карась [Crucian]	91,5	2300	23,9	1050	23,7	21,1	45 > 1
Теча / Муслюмово [Techa Riv./ Muslyumovo]	Линь [Lin]	45,8	2370	12,6	1530	24,1	30,5	55 > 1
	Лещ [Bream]	25,8	2100	20,9	1530	21,2	30,7	52 > 1

Течи, свидетельствуя о пищевой непригодности рыбы этой реки. Для остальных видов рыб на всем протяжении Иртыша и Оби этот показатель оставался значительно ниже единицы, подтверждая безопасность использования в качестве пищевого продукта всех представленных в таблице 2 промысловых видов рыб.

На рисунке 4 приведены графики, характеризующие содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в ихтиофауне и воде Обь-Иртышской речной системы на протяжении 2400 км от реки Течи до г. Лабитнанги.

Уровни содержания радионуклидов в воде определены как средние значения в створах за весь рассматриваемый период наблюдений. Соответствующие эмпирические модели, полученные по среднестатистическим значениям удельных активностей радионуклидов в сгруппированных выборках хищных и мирных рыб, для объединенного экспериментального массива приведены в таблице 3.

Отметим, что дистанционные профили концентрационных изменений для рыбы и воды вдоль речной системы подобны. Представленные результаты характеризуют резкое снижение содержания радионуклидов в рыбе на

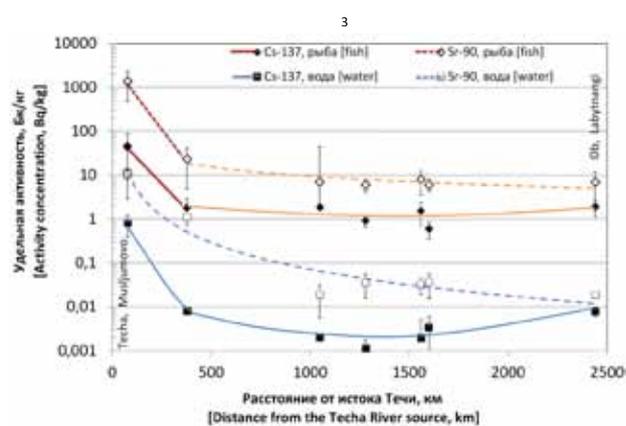


Рис. 4. Содержание радионуклидов в ихтиофауне и воде Обь-Иртышской речной системы в зависимости от расстояния от истока реки Течи

[Fig. 4. Radionuclides content in the ichthyofauna and water of the Ob-Irtysh river system versus the distance from the source of the Techa River]

Таблица 3

Эмпирические дистанционные модели, характеризующие содержание радионуклидов в рыбе

[Table 3

Empirical remote models characterizing the radionuclides content in fish]

Участок реки/рыба [River segment /fish]	⁹⁰ Sr, Бк/кг сыр. вес. (Bq/kg w.w.)	¹³⁷ Cs, Бк/кг сыр. вес. (Bq/kg w.w.)
<i>Участок Теча – Исеть (0–350 км): [River segment Techa – Iset (0–350 km)]</i>		
Все виды рыб [All the fish]	$y = 3990 e^{-0,014x}$	$y = 103 e^{-0,011x}$
Хищные рыбы [Predatory fish]	$y = 6460 e^{-0,015x}$	$y = 280 e^{-0,013x}$
Мирные рыбы [Peaceful fish]	$y = 3130 e^{-0,013x}$	$y = 49,3 e^{-0,009x}$
<i>Участок Исеть – Обь /Лабытнанги, (350–2400 км): [River segment Iset – Ob/Labytnangi (350–2400 km)]</i>		
Все виды рыб [All the fish]	$y = 1520 x^{-0,73}$, $R^2 = 0,81$ Среднее 6,8±0,8	$y = 8,02 \times 10^{-7} x^2 - 0,0022 x + 2,5$; $R^2 = 0,65$ Среднее 1,4±0,5

x – расстояние в километрах вдоль русла от истока Течи
[x – the distance (km) along the riverbed from the source of the Techa River]

участке рек Теча – Исеть: на два порядка по ⁹⁰Sr (с 2000 до 20 Бк/кг) и на один порядок по ¹³⁷Cs (с 40 до 2 Бк/кг). Содержание ⁹⁰Sr в иктофауне рек Исеть, Тобол, Иртыш и Обь до створа г. Лабытнанги сопровождается небольшим снижением по течению рек, тогда как содержание ¹³⁷Cs в рыбе представлено параболой с размытым широким минимумом в центральной части речной системы, демонстрируя спад на начальном участке и умеренный подъем на участке Нижней Оби. Аналогичные концентрационные изменения характерны и для воды.

Характерно, что показатели для иктофауны в створе Нижневартовска (представленном на диаграмме с условной координатой, равной расстоянию до Ханты-Мансийска), также удовлетворительно согласуются с приведенными моделями, характеризуя рыбу другой ветви речной системы, подверженной влиянию загрязнений с объектов Сибирского химкомбината.

При моделировании распределения радионуклидов в рыбе вся исследованная часть Обь-Иртышской речной системы с общей протяженностью 2400 км намеренно была разделена на два участка – начальный участок, включающий Течу и часть Исети, и весь остальной вплоть до Нижней Оби. Такой подход был продиктован стремлением более точного приближения аппроксимирующих эмпирических моделей к фактическим уровням загрязнения рыбы, прежде всего в диапазоне расстояний 300–500 км, соответствующих Исети. В противном случае модели, представленные одним общим уравнением для всей Обь-Иртышской речной системы, дают для иктофауны Исети завышенные величины, что и было принято во внимание.

Кроме того, эмпирические модели для содержания ¹³⁷Cs в иктофауне были также усложнены и представлены полиномами второй степени, отражая факт наблюдаемого увеличения содержания этого радионуклида в рыбе Нижней Оби. Это увеличение может быть связано с системным повышением содержания радионуклида в пойменных и донных отложениях вдоль русла Нижней

Оби, установленным в исследованиях 2014–2016 гг. [19]. Аккумуляция ¹³⁷Cs в донных и пойменных отложениях может сопровождаться дополнительным вовлечением радионуклида в пищевые цепи рыб и, как следствие, – увеличением накопления в ней. При этом в отношении ⁹⁰Sr такой закономерности не отмечено. Содержание ⁹⁰Sr в воде на участках Нижней и Средней Оби находится в состоянии динамического равновесия, при котором его годовые стоки на входе и выходе участка практически равны, а запасы в пойме распределены равномерно [19]. Это удовлетворительно согласуется с относительно равномерным содержанием ⁹⁰Sr в рыбе в широком диапазоне расстояний (см. рис. 4).

Известно, что водная компонента в пресноводных речных экосистемах в процессе переноса радиоактивных элементов выполняет транспортную функцию, а пойменные почвы и донные отложения являются основным депо радионуклидов [8]. Накопление радионуклидов в организме рыб подчиняется более сложным механизмам их движения по пищевым цепям. Самым нижним автотрофным звеном пищевых цепей являются низшие растения и водоросли, первично аккумулирующие радионуклиды из воды. На каждом последующем уровне пищевой цепи происходит дальнейшее концентрирование радионуклидов по степенной прогрессии и конечной точкой являются хищные рыбы (принцип биомагнификации). Вместе с тем, наличие зависимости уровней накопления радионуклидов в рыбе от их содержания в исходной компоненте – водной среде, является чрезвычайно важным для понимания процессов распределения радионуклидов в иктофауне и предварительной оценки уровней их накопления в рыбе на различных участках речных экосистем.

На рисунке 5 представлены закономерности накопления радионуклидов в иктофауне Обь-Иртышской речной системы в виде степенных зависимостей от содержания этих радионуклидов в воде.

Высокие значения коэффициента детерминации R^2 в представленных графиках подтверждают наличие сильной корреляции между содержанием радионуклидов в ихтиофауне и в воде. Проверка качества полученных кон-

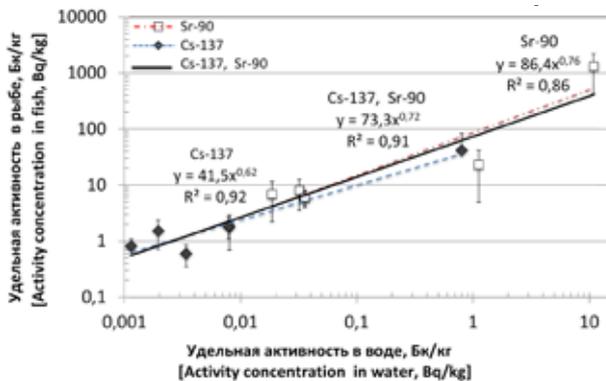


Рис. 5. Содержание радионуклидов в ихтиофауне Обь-Иртышской речной системы в зависимости от их содержания в воде

[Fig. 5. Radionuclides content in the ichthyofauna of the Ob-Irtysh river system versus the activity in water]

центрационных моделей с использованием F -критерия Фишера дает следующие результаты:

- для ^{90}Sr :
 $y = 86,38 x^{0,76}$; $R^2 = 0,86$; $n=5$; $F_{\text{эксп}}(0,86; 1; 3) = 18,43 > F_{\text{крит}}(0,05, 1, 3) = 10,13$ (3)
- для ^{137}Cs :
 $y = 41,49 x^{0,62}$; $R^2 = 0,92$; $n=5$; $F_{\text{эксп}}(0,92; 1; 3) = 34,5 > F_{\text{крит}}(0,05, 1, 3) = 10,13$ (4)
- для ^{90}Sr или ^{137}Cs :
 $y = 73,29 x^{0,72}$; $R^2 = 0,91$; $n=10$; $F_{\text{эксп}}(0,91; 1; 8) = 80,9 > F_{\text{крит}}(0,05, 1, 8) = 5,32$ (5)

Во всех рассмотренных случаях экспериментальные значения критерия Фишера $F_{\text{эксп}}$ превышают его табличные критические значения $F_{\text{крит}}$ при уровне значимости 0,05, подтверждая адекватность аппроксимирующих концентрационных моделей.

Известно, что накопление радионуклидов в организме рыб определяется сложными биохимическими процессами, на которые оказывает влияние не только концентрация радионуклидов в воде, но и содержание в воде конкурирующих химических элементов, прежде всего ионов калия и кальция [12–16]. Представленные авторами эмпирические модели интегрируют в себе весь комплекс факторов, действующих на ихтиофауну Обь-Иртышской речной системы, включая концентрацию радионуклидов в воде, их движение по пищевым цепям, поступление и накопление в организмах рыб. В неявной форме (в виде параметрических коэффициентов регрессионных уравнений) модели учитывают также и другие действующие в экосистеме факторы, в том числе общий химический фон водной среды и наличие конкурирующих ионов.

Обобщенная эмпирическая модель для ^{90}Sr и ^{137}Cs (см. рис. 5), представленная регрессионным уравнением (5), позволяет выполнить оценку ожидаемой удельной активности в рыбе для каждого из рассматриваемых радионуклидов независимо друг от друга, используя их средние удельные активности в воде.

Предложенные выше модели (3–5) можно использовать для предварительной оценки среднего содержания радионуклидов в рыбе на основе результатов измерений среднегодовых концентраций этих радионуклидов в воде исследуемого участка речной системы, а также для решения обратной задачи – оценки объемной активности радионуклидов в воде по результатам измерений их активности в статистической выборке рыб, как биоиндикатора радиационного загрязнения. Эта задача может быть актуальна для мониторинга труднодоступных участков водоемов, где отбор и доставка проб воды сопряжены с объективными трудностями.

Заключение

В статье представлены систематизированные результаты радиоэкологических исследований ихтиофауны Обь-Иртышской речной системы, проведенные в период 2004–2016 гг. на реках Теча, Иртыш и Обь. Приведены среднестатистические величины удельных активностей ^{90}Sr и ^{137}Cs в рыбе исследованных участков. Дана оценка пригодности использования рыбы в качестве пищевого продукта с различных участков Обь-Иртышской речной системы, общей протяженностью более 2400 км.

Показано, что по 11 видам рыб максимальные уровни средней удельной активности ^{90}Sr и ^{137}Cs зарегистрированы в Тече: 1400 Бк/кг по ^{90}Sr и 42 Бк/кг по ^{137}Cs для общего массива данных, в том числе по хищным видам – 2020 и 98 Бк/кг и мирным – 1100 и 25 Бк/кг соответственно. На других участках Оби и Иртыша средние показатели удельной активности радионуклидов в рыбе были существенно ниже и охватывали меньший диапазон вариаций: по ^{90}Sr – от 6,0 до 8,1 Бк/кг (среднее 6,8) и по ^{137}Cs – от 0,6 до 1,9 Бк/кг (среднее 1,3).

Проверка на соответствие критериям радиационной безопасности с использованием показателя соответствия B и его неопределенности ΔB показала непригодность использования в пищевых целях по радиационному фактору всех исследованных видов рыб из реки Течи, где показатель $(B+\Delta B) \sim 45-55 > 1$ значительно превышал единичное значение. Рыба из всех остальных исследованных участков Обь-Иртышской речной системы соответствует критериям радиационной безопасности $(B+\Delta B) \sim (0,06 \div 0,53) < 1$ и может быть использована в пищу.

В работе представлены эмпирические модели, характеризующие распределение ^{90}Sr и ^{137}Cs в ихтиофауне вдоль Обь-Иртышской речной системы на протяжении 2400 км от реки Течи до г. Лабитнанги на реке Обь. Модели описывают резкое снижение удельной активности радионуклидов в рыбе на участке рек Теча – Исеть на два порядка по ^{90}Sr (с 2000 до 20 Бк/кг) и на один порядок по ^{137}Cs (с 40 до 2 Бк/кг). На участке Нижней Оби отмечено некоторое увеличение содержания в рыбе ^{137}Cs , что может быть связано с увеличением содержания данного радионуклида в пойменных почвах и донных отложениях этого участка реки.

С высокой степенью достоверности ($R^2 > 0,86$ для ^{90}Sr и $R^2 > 0,92$ для ^{137}Cs) показано наличие степенной зависимости между содержанием радионуклидов в ихтиофауне и их содержанием в воде. Эмпирические модели, кроме концентрации радионуклидов в воде, интегрируют в себе весь комплекс факторов, включая их движение по пищевым цепям, поступление и накопление в организме рыб, а

также косвенно отражают общий химический фон водной среды и другие факторы, влияющие на уровень накопления радионуклидов ихтиофауной.

Организация экспедиций и отбор проб ихтиофауны в районах Нижней Оби выполнены при финансовой поддержке проекта Комплексной программы УрО РАН № 18-9-4-9. Отбор проб материала из рек Теча, Исеть, Иртыш, пробоподготовка и измерение концентраций ^{137}Cs и ^{90}Sr в рыбе, а также интерпретация результатов выполнены в рамках государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН.

Литература

1. Заключение комиссии по оценке экологической ситуации в районе Производственного объединения «Маяк», организованной по решению Президиума АН СССР № 1140-501 // Радиобиология. – 1991. – Т. 31, вып. 1. – С. 436-452.
2. Заключение комиссии под председательством вице-президента АН СССР О.М. Нефедова, организованной распоряжением Президента СССР №РП-1283 от 3 сентября 1991 года, по экологической и радиозэкологической обстановке в Челябинской области. Москва, 1991. – 157 с.
3. Чуканов, В.Н. Генезис и концепция Государственной программы Российской Федерации по радиационной реабилитации Уральского региона / В.Н. Чуканов, П.В. Волобуев, Е.Г. Дрожко, Б.А. Коробицын, Г.Н. Романов, Л.Г. Стоббе, А.В. Трапезников, В.А. Ячменев, В.И. Киришкин. – Екатеринбург, 1993. – 66 с.
4. Trapeznikov A., Aarkrog A., Pozolotina V., Nielsen S.P., Polikarpov G., Molchanova I., Karavaeva E., Yushkov P., Trapeznikova V. Radioactive pollution of the Ob river system from Urals nuclear enterprise «Mayak». J. Environ. Radioactivity., 1994, № 25, pp. 85-98.
5. Булатов, В.И. Томская авария: мог ли быть сибирский Чернобыль? / В.И. Булатов, В.А. Чирков. – Новосибирск: ЦЭРИС, 1994. – 32 с.
6. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 1992 – 1996 гг. Ежегодник. / Под ред. К.П. Махонько. – Обнинск: НПО «Тайфун», 1996.
7. Ядерные взрывы в СССР. Вып. 1. Северный испытательный полигон. // Справочная информация. – М., 1992.
8. Трапезников, А.В. Радиозэкология пресноводных экосистем / А.В. Трапезников, В.Н. Трапезникова. – Екатеринбург: Изд-во УрГСХА, 2006. – 390 с.
9. Трапезников, А.В. Радиозэкологические исследования Обь-Иртышской речной системы на территории Ханты-Мансийского автономного округа / А.В. Трапезников, А.В. Коржавин, В.Н. Трапезникова, В.Н. Николкин, В.И. Мигунов // Вопросы радиационной безопасности. – 2009. – Спецвыпуск 1. – С. 73-85.
10. Трапезникова, В.Н. Накопление ^{137}Cs в промысловых рыбах водоема-охладителя Белоярской АЭС / В.Н. Трапезникова, А.В. Трапезников, Н.В. Куликов // Экология. – 1984, № 6. – С. 36-40.
11. Трапезников, А.В. ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$ в пресноводных экосистемах / А.В. Трапезников. – Екатеринбург: Изд-во «АкадемНаука», 2010. – 510 с.
12. Koulikov, A.O., Ryabov, I.N. Specific cesium activity in freshwater fish and size effect. Sci. Total Environ., 1992, 112, pp. 125-142.
13. Koulikov, A.O. Physiological and ecological factors influencing the radiocaesium contamination of fish species from Kiev reservoir. Sci. Total Environ., 1996, 177, pp. 125-135.
14. Kryshev, A.I. ^{90}Sr in fish: a review of data and possible model approach. Sci. Total Environ., 2006, 370, pp. 182-189.
15. Wang, W.-X., Caihuan, K. Yu., [et al.] Modeling radiocesium bioaccumulation in a marine food chain. Mar. Ecol. Prog. Ser., 2000, 208, pp. 41-50.
16. Heldal, H.E., Foyn, L., Varskog, P. Bioaccumulation of ^{137}Cs in pelagic food webs in the Norwegian and Barents Seas. J. Environ. Radioact., 2003, 65, pp. 177-185.
17. Трапезников, А.В. Радиозэкологический мониторинг пресноводных экосистем / А.В. Трапезников, В.Н. Трапезникова, А.В. Коржавин, В.Н. Николкин. – Екатеринбург: Изд-во «АкадемНаука», 2014.- Том I. – 496 с.
18. Трапезников, А.В. Радиозэкологический мониторинг пресноводных экосистем / А.В. Трапезников, В.Н. Трапезникова, А.В. Коржавин, В.Н. Николкин. – Екатеринбург: Изд-во «АкадемНаука», 2016. – Том II. – 480 с.
19. Трапезников, А.В. Распределение радионуклидов в воде, донных отложениях и пойменных почвах нижней Оби в границах Ямало-Ненецкого автономного округа / А.В. Трапезников, В.Н. Николкин, А.В. Коржавин, В.Н. Трапезникова // Радиационная биология. Радиозэкология. – 2018. – том 58, № 4. – С. 406-414.

Поступила: 20.05.2019 г.

Трапезников Александр Викторович – доктор биологических наук, заведующий отделом континентальной радиозэкологии Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук. **Адрес для переписки:** 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202; E-mail: vega_zar@mail.ru

Николкин Виктор Николаевич – научный сотрудник Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Коржавин Александр Васильевич – кандидат ветеринарных наук, старший научный сотрудник Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Трапезникова Вера Николаевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Для цитирования: Трапезников А.В., Николкин В.Н., Коржавин А.В., Трапезникова В.Н. Радиационно-гигиеническая оценка содержания и распределения ^{90}Sr и ^{137}Cs в ихтиофауне Обь-Иртышской речной системы // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 3. – С. 16-26. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-16-26

Radiation-hygienic assessment of the concentration and distribution of ^{90}Sr and ^{137}Cs in ichthyofauna of the Ob'-Irtys' river system

Aleksandr V. Trapeznikov, Viktor N. Nikolkin, Aleksandr V. Korzhavin, Vera N. Trapeznikova

Continental radioecology Department of the Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural branch, Yekaterinburg, Russia

The aim of the work is the radiation-hygienic assessment of ^{90}Sr and ^{137}Cs content in fish of the Ob-Irtys' river system and the study of the basic laws of the radionuclides accumulation in the ichthyofauna of these rivers. To perform this task, long-term results of radioecological studies of fish from the Techa, Irtys' and Ob rivers for the period 2004-2016 were used. Fish as a food product was evaluated according to two criteria: a) permissible levels of radionuclides specific activity (SanPiN 2.3.2.1078-01); b) using the indicator of conformity B and uncertainty of its definition ΔB (GOST 32161-2013 and GOST 32163-2013). It is shown that a higher content of radionuclides is observed in the ichthyofauna of the Techa river (1379.1 Bq/kg for ^{90}Sr and 41.9 Bq/kg for ^{137}Cs). On the Ob and Irtys' rivers, the average specific activity of radionuclides in fish was significantly lower and slightly changed during the surveyed area: for ^{90}Sr in the range of $6.0 \div 8.1$ Bq/kg (mean 6.8), for ^{137}Cs — $0.6 \div 1.9$ Bq/kg (mean 1.3). Assessment for compliance with radiation safety criteria using the indicator of compliance and its uncertainty ($B + \Delta B$) confirmed the unsuitability of use for food purposes by the radiation factor of all studied fish species from the Techa river ($45 \div 55 > 1$). Fish from all other studied areas of the Ob-Irtys' river system can be used for food without restrictions ($0.06 \div 0.53 < 1$). The distribution of ^{90}Sr and ^{137}Cs in the ichthyofauna of the Ob-Irtys' river system part over a 2400 km is presented in the form of empirical regression models. The models describe a sharp decrease in the radionuclides specific activity in fish in the Techa and Iset rivers by two orders for ^{90}Sr (from 2000 to 20 Bq/kg), and by one order for ^{137}Cs (from 40 to 2 Bq/kg). With a high degree of reliability ($R^2 > 0.86$ for ^{90}Sr and $R^2 > 0.92$ for ^{137}Cs), the presence of power relationships between the content of radionuclides in the ichthyofauna and their content in water was shown, with adequacy confirmed by Fisher's F-criteria. This can be used for a preliminary assessment of the radionuclides level in fish based on the results of measurements of the average annual concentrations of these radionuclides in water.

Key words: Ob-Irtys' river system, ichthyofauna, technogenic radionuclides, sanitary-hygienic assessment, empirical models of distribution.

References

1. Conclusion of the Commission on environmental assessment in the area of Production Association "Mayak", organized by the Presidium of the USSR Academy of Sciences № 1140-501. Radiobiologiya = Radiobiology, 1991, Vol. 31, issue. 1, pp. 436-452. (In Russian)
2. Conclusion of the Commission chaired by Vice-President of the USSR Academy of Sciences O. M. Nefedov, organized by the order of the President of the USSR № RP-1283 September 3, 1991, on environmental and radio-ecological situation in the Chelyabinsk region. Moscow, 1991, 157 p. (In Russian)
3. Chukanov V.N., Volobuev P.V., Drozhko E.G., Korobitsyn A.B., Romanov G.N., Stobbe L.G., Trapeznikov A.V., Yachmenev V.A., Kiryushkin V.I. Genesis and concept of the State program of the Russian Federation on radiation rehabilitation of the Ural region. Yekaterinburg, 1993, 66 p. (In Russian)
4. Trapeznikov A., Aarkrog A., Pozolotina V., Nielsen S. P., Polikarpov G., Molchanova I., Karavaeva E., Yushkov P., Trapeznikova V. Radioactive pollution of the Ob river system from Urals nuclear enterprise "Mayak". J. Environ. Radioactivity, 1994, № 25, pp. 85-98.
5. Bulatov V.I., Chirkov V.A. Tomsk accident: could there be Siberian Chernobyl? Novosibirsk: CERES, 1994, 32 p. (In Russian)
6. The Radiation situation on the territory of Russia and neighboring States from 1992 to 1996 Yearbook. Ed. by K. P. Makhonko. Obninsk, "Typhoon", 1996. (In Russian)
7. Nuclear explosions in the USSR. Issue.1. Northern test site. Reference information. Moscow, 1992. (In Russian)
8. Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N. Radioecology of freshwater ecosystems. Yekaterinburg, Publishing house of the Ural state, 2006, 390 p. (In Russian)
9. Trapeznikov A.V., Korzhavin A.V., Trapeznikova V.N., Nikolkin V.N., Migunov V.I. Radioecological studies of the Ob-Irtys' river system on the territory of the Khanty-Mansiysky Autonomous Okrug. Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Issues of radiation safety, 2009, Special issue 1, pp. 73-85. (In Russian)
10. Trapeznikova V.N., Trapeznikov A.V., Kulikov N.I. The accumulation of ^{137}Cs in the commercial fish of the Beloyarskaya NPP cooling reservoir. Ekologiya = Ecology, 1984, No. 6, pp. 36-40. (In Russian)
11. Trapeznikov A.V. ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$ in freshwater ecosystems. Yekaterinburg: Publishing house "Academia", 2010, 510 p. (In Russian)
12. Koulikov, A.O., Ryabov, I. N. Specific cesium activity in freshwater fish and size effect. Sci. Total Environ, 1992, 112, pp. 125-142.
13. Koulikov, A.O. Physiological and ecological factors influencing the radiocaesium contamination of fish species from Kiev reservoir. Sci. Total Environ, 1996, 177, pp. 125-135.
14. Kryshev, A.I. ^{90}Sr in fish: a review of data and possible model approach. Sci. Total Environ, 2006, 370, pp. 182-189.
15. Wang, W.-X., Caihuan, K. Yu [et al.] Modeling radiocaesium bioaccumulation in a marine food chain. Mar. Ecol. Prog. Ser., 2000, 208, pp. 41-50.
16. Heldal, H.E., Foyn, L., Varskog, P. Bioaccumulation of ^{137}Cs in pelagic food webs in the Norwegian and Barents Seas. J. Environ. Radioact., 2003, 65, pp. 177-185.

Aleksandr V. Trapeznikov

Continental radioecology Department of the Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural branch

Address for correspondence: 8 Marta Str., 202, Yekaterinburg, 620144; E-mail: vera_zar@mail.ru

17. Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Korzhavin A.V., Nikolkin V.N. Radio-ecological monitoring of freshwater ecosystems. Yekaterinburg: Publishing house "Academia", 2014, Vol. I, 496 p. (In Russian)
18. Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Korzhavin A.V., Nikolkin V.N. Radio-ecological monitoring of freshwater ecosystems. Yekaterinburg: Publishing house "Academia", 2016, Vol. II, 480 p. (In Russian)
19. Trapeznikov A.V., Nikolkin V.N., Korzhavin A.V., Trapeznikova V.N. Distribution of radionuclides in water, bottom sediments and floodplain soils of the lower Ob within the boundaries of the Yamalo-Nenetsky Autonomous Okrug. Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation biology. Radioecology, 2018, Vol. 58, № 4, pp 406-414. (In Russian)

Received: May 20, 2019

For correspondence: Aleksandr V. Trapeznikov – Dr. Biol. Sci., Head of the Continental radioecology Department of the Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural branch (8 Marta Str., 202, Yekaterinburg, 620144; E-mail: vera_zar@mail.ru)

Viktor N. Nikolkin – scientific associate of the Continental radioecology Department of the Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural branch, Yekaterinburg, Russia

Aleksandr V. Korzhavin – PhD. Vet. Sci., Chief Science Officer of the Continental radioecology Department of the Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural branch, Yekaterinburg, Russia

Vera N. Trapeznikova – PhD. Biol. Sci., Chief Science Officer of the Continental radioecology Department of the Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural branch, Yekaterinburg, Russia

For citation: Trapeznikov A.V., Nikolkin V.N., Korzhavin A.V., Trapeznikova V.N. Radiation-hygienic assessment of the concentration and distribution of ^{90}Sr and ^{137}Cs in ichthyofauna of the Ob'-Irtysh river system. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 16-26. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-3-16-26