

НАКОПЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В РЫБЕ ИЗ РЕК СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

А. В. Пучков, А. С. Дружинина, Е. Ю. Яковлев, С. В. Дружинин
Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени
Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (Архангельск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 23 августа 2022 г.

Представлены результаты исследований содержания радионуклидов в рыбе, обитающей в реках северо-западного сектора Арктической зоны России. Показано наличие Cs-137 и Sr-90 в рыбе только из реки Несь. Наибольшее количество Cs-137 и Sr-90 содержится в мышечной ткани рыбы и смеси кожи, чешуи, плавников соответственно. Вероятной причиной наличия искусственных радионуклидов в рыбе реки Несь является радиоактивный след, возникший при ядерных испытаниях на архипелаге Новая Земля. Отмечается, что уровни радиоактивности в рыбе из Неси не представляют значительного радиологического риска.

Ключевые слова: Арктика, рыба, радионуклиды, Cs-137, Sr-90, K-40.

Введение

В морской и речной экосистемах присутствуют как техногенные, так и естественные радионуклиды [1]. Техногенные радионуклиды попадают в окружающую среду в результате деятельности человека, а именно за счет испытаний ядерного оружия в атмосфере, деятельности радиационно опасных объектов по обращению с радиоактивными отходами и ядерными материалами, эксплуатации транспортных (атомных кораблей) и стационарных (атомных электростанций) ядерно-энергетических установок, в результате глобальных и региональных ядерных и радиационных инцидентов и т. д. [2; 3]. Основным источником общего радиоактивного загрязнения являются радиоактивные осадки в результате испытаний ядерного оружия в атмосфере, проведенных в период с 1945 по 1980 гг. в основном США и СССР [4].

Особое внимание уделяется изучению окружающей среды Северного полушария за счет наибольшего уровня загрязнения в результате глобальных ядерных выпадений и относительно медленного атмосферного перемешивания в продольной плоскости Земли [4; 5]. Так, северо-западная часть арктического региона России отличается большим количеством антропогенных источников радионуклидов, которые способствовали и потенциально

могут способствовать загрязнению данной территории в будущем [4]. Одними из основных источников загрязнения этого региона являются последствия ядерных испытаний, крупнейшим из которых было атмосферное испытание устройства мощностью 50 Мт на Новой Земле в 1961 г. [4].

Распределение радионуклидов в морских и речных экосистемах интенсивно изучается в связи с биоаккумуляцией радионуклидов в водных организмах [4; 6; 7]. Радионуклиды концентрируются в тканях рыбы и передаются по пищевым цепям, подвергая организмы воздействию ионизирующего излучения [1]. При этом в связи с аккумулятивной способностью рыба становится своеобразным биоиндикатором наличия в природных средах радионуклидов как природного, так и техногенного происхождения [8]. По литературным данным, накопление рыбой радионуклидов происходит индивидуально для каждого вида [9; 10]. Установлено, что различия в размере или возрасте морских гидробионтов, различия в трофическом уровне и вертикальном распределении в толще воды приводят к разным уровням накопления [11]. В свою очередь, процессы накопления зависят от химических свойств элементов, их роли в обменных процессах, положения организмов в пищевой цепи и параметров морской среды [9; 10].

Одними из основных техногенных радиоактивных загрязнителей гидробионтов являются долгоживущие техногенные радионуклиды Cs-137



Рис. 1. Изученные водоемы Архангельской области и Ненецкого автономного округа (использован спутниковый снимок из сервиса «Google Карты»)

Fig. 1. The studied water bodies of the Arkhangelsk region and the Nenets Autonomous Area (a satellite image from the service “Google Maps” was used for the schematic map)

($T_{1/2} = 30,1$ года) и Sr-90 ($T_{1/2} = 28$ лет) [2; 8]. Наличие этих радионуклидов в природной среде обусловлено деятельностью предприятий по обращению с радиоактивными отходами, ядерными энергетическими установками, а также проведенными ранее испытаниями ядерного оружия и «мирными» ядерными взрывами [12]. Радионуклиды Cs-137 и Sr-90 проявляют значительную способность к усвоению морскими организмами за счет сходств химических свойств с калием и кальцием соответственно [10; 13; 14]. Кроме техногенных в рыбе могут накапливаться и естественные радионуклиды, к которым в первую очередь относится К-40. Он вносит основной вклад в общую естественную радиоактивность морской среды [15].

Проведенные в прошлом ядерные испытания, все возрастающий уровень антропогенной деятельности, в том числе по использованию радиоактивных материалов и обращению с радиоактивными отходами, высокая вероятность возможных ядерных и радиационных инцидентов обуславливают актуальность оценки накопления рыбой радионуклидов как искусственного, так и естественного происхождения. Поэтому цель данной работы состоит в установлении уровня накопления радиоактивных

изотопов в рыбе в реках северо-западного сегмента российской Арктики, а также выявление характера распределения радионуклидов в организме рыб.

Материалы и методы

Пробы гидробионтов (щуки *Esox lucius* L., окуня *Perca fluviatilis* L.) отбирались на реках Мезень (Архангельская область), Несь и Печора (Ненецкий автономный округ). Далее рыбы разделялись на отдельные биологические системы (мышечную ткань, костную ткань, чешую, плавники, головы, внутренности). Расположение участков исследований показано на рис. 1.

Выбор региона для исследования обусловлен ранее полученными результатами по изучению гидробионтов Ненецкого автономного округа [16], а также наличием большого количества источников радиационного загрязнения как внутри региона, так и вокруг него: атмосферных и наземных испытаний ядерного оружия (архипелаг Новая Земля), участков захоронения жидких и твердых радиоактивных отходов (Баренцево море), затопленных атомных подводных лодок, мирных ядерных взрывов в Архангельской области (три взрыва) и Ненецком автономном округе (один взрыв), судостроительных

и судоремонтных заводов (Северодвинск), захоронений радиоактивных отходов западноевропейских радиохимических заводов (в Нидерландах, Великобритании), объектов морской ядерной инфраструктуры на Кольском полуострове.

Пробы рыбы разделялись на отдельные биологические системы и были доведены до сухого состояния в сушильном шкафу BINDER E28. После высушивания пробы озолялись при температуре не выше 400°C во избежание потери радионуклидов.

Радионуклиды Cs-137 и K-40 определялись на низкофоновом полупроводниковом гамма-спектрометре ORTEC (США) с коаксиального детектора GEM40 на основе германия высокой чистоты (HPGe) с программным обеспечением SpectraLine. Разрешение гамма-спектрометра по линии 1,33 МэВ (Co-60) составляло 1,75 кэВ, относительная эффективность — 43%. В качестве рабочей геометрии для измерений были выбраны пластиковые стаканы разного объема. Время измерения выбиралось в диапазоне 2—5 ч. Активность радионуклида Cs-137 определяли по гамма-линии 661,66 с квантовым выходом 89,90%. Активность радионуклида K-40 определяли по линии 1460,82 кэВ с квантовым выходом 10,66%. Минимальная измеряемая активность при времени экспозиции $t = 7200$ с (геометрия — стакан 200 мл) для детектора GEM40 составила для K-40 7,0 Бк, для Cs-137 — 0,08 Бк.

Параметры суммарной активности по альфа- и бета-излучению определяли с помощью альфа-бета-радиометра РКС-01 «Абеля» (НТЦ «Амплитуда», Россия) и 10-канального альфа-бета-радиометра LB 770 («Berthold Technologies GmbH & Co. KG», Германия). Количество счетных образцов было не менее двух для каждой пробы. Суммарная удельная альфа-, бета-активность рассчитывалась по формуле

$$A_{\text{total_alpha(beta)}} = \frac{N_s - N_b}{\text{Eff} \cdot M \cdot K_{\text{abs}}},$$

где $A_{\text{total_alpha(beta)}}$ — суммарная удельная активность альфа- (бета-) излучения в образце, Бк/кг; N_s — скорость счета образца по альфа- (бета-) излучению, имп./с; N_b — скорость счета альфа- (бета-) фона на радиометре, имп./с; Eff — показатель эффективности радиометра по энергии альфа- (бета-) излучения в соответствии с техническими параметрами радиометра, %; M — масса пробы, кг; K_{abs} — коэффициент поглощения альфа- (бета-) излучения в счетном образце, %.

Определение радионуклида Sr-90 проводили по его дочернему продукту распада Y-90. Методика радиохимического выделения Y-90 основана на осаждении Y-90 и оксалатов кальция в кислых условиях, дополнительной очистке стронция, накоплении и выделении на первой стадии дочернего Y-90 в виде гидроксидов с последующим выделением Y-90 в виде оксалата и измерением его активности

бета-излучением. Удельная активность Sr-90 после измерения радиохимически выделенного Y-90 рассчитывалась по формуле

$$A_{\text{Sr90}} = \frac{N_s - N_b}{\text{Eff} \cdot M \cdot \text{ChLos} \cdot K_{\text{abs}}},$$

где A_{Sr90} — удельная активность Sr-90 в пробе, Бк/кг; N_s — скорость счета пробы на радиометре, имп./с; N_b — скорость счета фона на радиометре, имп./с; Eff — показатель эффективности радиометра по энергии бета-излучения Y-90 ($E = 2260$ кэВ), %; M — масса счетной пробы, кг; ChLos — радиохимический выход Y-90, %; K_{abs} — коэффициент поглощения бета-излучения, %.

После радиохимической подготовки Sr-90 определяли с помощью альфа-бета-радиометра РКС-01 «Абеля» (НТЦ «Амплитуда», Россия) и 10-канального альфа-бета-радиометра LB 770 («Berthold Technologies GmbH & Co. KG», Германия). Дополнительно пробы, в которых был обнаружен радионуклид Sr-90, измерялись на бета-спектрометрах «Бета-1С» со сцинтилляционным детектором (ОАО «НПЦ «АСПЕКТ»», Россия).

Пероральная доза поступления радионуклидов рассчитывалась согласно ICRP [17] в соответствии с формулой

$$H_{T,r} = \sum U_i C^r g_{T,r},$$

где U_i — норма потребления (кг/год); C^r — активность радионуклида r (Бк/кг); $g_{T,r}$ — коэффициент преобразования дозы при попадании радионуклида (Зв/Бк) в ткани T ; для взрослых рекомендуемые коэффициенты преобразования дозы $g_{T,r}$ таковы: K-40 — $6,2 \cdot 10^{-9}$ Зв/Бк, Cs-137 — $1,3 \cdot 10^{-8}$ Зв/Бк, Sr-90 — $2,8 \cdot 10^{-8}$ Зв/Бк.

Результаты и обсуждение

В проведенных ранее исследованиях [16] выявлено, что в смешанных пробах рыбы из реки Несь определены относительно повышенные удельные активности изотопов Cs-137 (до 11,2 Бк/кг) и Sr-90 (до 19,1 Бк/кг). Полученные ранее результаты показали необходимость дополнительных исследований гидробионтов с расширением территории и изучением распределения радионуклидов по отдельным биологическим системам рыб. Результаты исследований, проведенных в Несе, Мезени и Печоре, представлены в табл. 1.

Образцы рыбы без разделения на биологические системы характеризуются значениями суммарной бета-активности в интервале 76,7—113,5 Бк/кг, альфа-активность на уровне минимально измеряемых активностей (МИА), количество Cs-137 от МИА до 14,0 Бк/кг, содержание Sr-90 от МИА до 6,0 Бк/кг и K-40 в интервале от 77,0 до 115,9 Бк/кг. Для всех образцов рыб основным дозообразующим радионуклидом оказался природный радионуклид

Таблица 1. Результаты измерений радиационных параметров рыбы в реках Несь, Печора и Мезень

Вид рыбы, количество	Биологическая система	Радиационные характеристики, Бк/кг				
		Вес, г	β -активность	Cs-137	Sr-90	K-40
<i>Несь</i>						
Окунь, 6 шт.	Образцы целиком	2079	113,5±18,1	3,73±1,21	6,60±2,31	115,9±15,1
	Мышечная ткань	820	142,1±22,7	5,22±0,99	< 1,4	136,2±17,7
	Костная ткань	349	124,5±20,0	3,60±1,01	< 2,3	118,0±14,2
	Кожа, чешуя, плавник	295	85,3±13,6	2,00±0,68	21,67±4,55	61,2±9,2
	Внутренности	264	65,3±10,4	2,32±0,77	< 3,3	173,6±20,8
	Головы	351	96,9±15,5	2,87±0,92	12,84±3,98	70,1±11,2
Щука, 6 шт.	Образцы целиком	1984	96,0±15,4	14,0±1,7	< 3,72	83,8±11,7
	Мышечная ткань	753	129,0±20,6	19,5±2,1	< 1,39	112,1±14,6
	Костная ткань	107	151,8±24,3	17,9±2,0	< 7,80	131,3±17,1
	Кожа, чешуя, плавник	341	101,1±16,2	14,8±1,9	< 7,20	86,0±12,0
	Внутренности	448	48,2±7,7	6,85±1,31	< 0,93	44,4±2,3
	Головы	335	62,9±10,1	9,38±1,52	< 7,82	55,5±8,3
<i>Печора</i>						
Окунь, 6 шт.	Образцы целиком	4533	79,05±12,65	< 0,28	< 4,21	77,0±11,6
	Мышечная ткань	1320	105,2±16,8	< 0,21	< 1,30	102,3±13,3
	Костная ткань	360	105,4±16,9	< 0,46	< 7,64	101,6±13,2
	Кожа, чешуя, плавник	1080	74,1±11,9	< 0,42	< 5,12	73,3±9,5
	Внутренности	849	58,2±9,3	< 0,17	< 1,28	57,4±9,2
	Головы	924	56,4±9,0	< 0,24	< 8,67	53,8±8,6
Щука, 5 шт.	Образцы целиком	13995	83,5±13,4	0,44±0,21	< 3,19	79,9±12,0
	Мышечная ткань	5310	122,6±19,6	0,57±0,27	< 1,53	121,1±14,5
	Костная ткань	755	99,2±15,9	< 0,52	< 5,1	94,0±14,1
	Кожа, чешуя, плавник	2405	41,6±6,7	< 0,33	< 3,32	38,2±7,6
	Внутренности	3160	62,5±10,0	0,31±0,16	< 0,99	60,8±7,9
	Головы	2365	61,4±9,8	< 0,38	< 9,1	51,0±6,6
<i>Мезень</i>						
Щука, 3 шт.	Образцы целиком	8430	93,5±15,0	< 0,44	< 3,53	88,4±15,0
	Мышечная ткань	3270	135,1±21,6	< 0,52	< 2,41	129,1±15,5
	Костная ткань	486	110,2±17,6	< 0,52	< 4,95	102,2±14,3
	Кожа, чешуя, плавник	1494	55,1±8,8	< 0,33	< 4,03	48,7±7,8
	Внутренности	1740	69,9±11,2	< 0,52	< 1,55	65,8±9,9
	Головы	1440	61,6±9,9	< 0,25	< 7,5	59,9±9,6
Окунь, 6 шт.	Образцы целиком	3640	76,7±12,3	< 0,37	< 4,6	75,5±10,6
	Мышечная ткань	960	93,4±14,9	< 0,31	< 2,10	95,4±13,4
	Костная ткань	240	96,2±15,4	< 0,50	< 6,50	92,6±12,0
	Кожа, чешуя, плавник	890	72,2±11,6	< 0,51	< 6,10	70,6±9,2
	Внутренности	740	69,5±11,1	< 0,30	< 2,42	65,4±9,2
	Головы	810	62,8±10,0	< 0,31	< 7,55	61,5±8,0

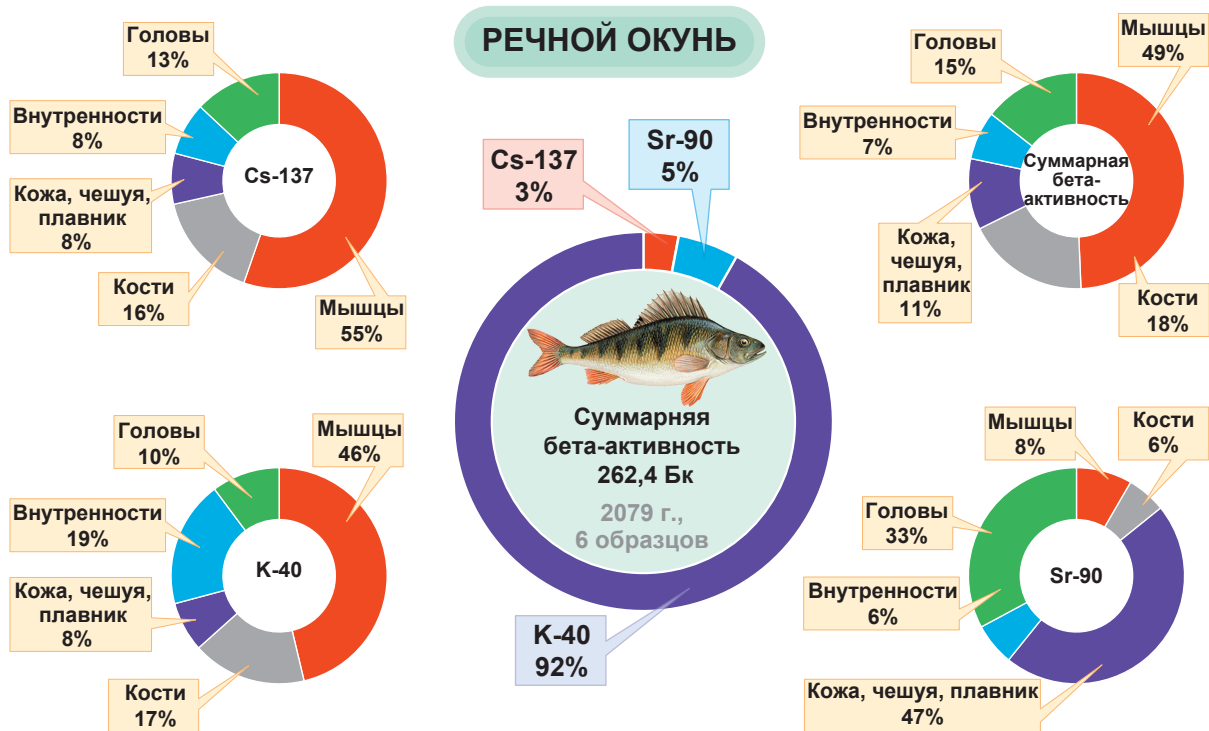


Рис. 2. Распределение радионуклидов по органам и тканям речного окуня с реки Несь (изображение окуня взято из интернет-ресурсов)
 Fig. 2. Distribution of radionuclides in organs and tissues of river perch from the Nes River (Perch image is taken from Internet resources)

K-40, содержание которого превышает 86% общей активности бета-излучающих радионуклидов. Наибольшее накопление радиоизотопа Cs-137 наблюдается для рыбы из Неси (3—14%). Стоит отметить, что для щуки концентрация Cs-137 больше, чем для окуня. Однако наибольшее содержание изотопа Sr-90 (5%) определено для окуня. В Печоре и Мезени искусственных радионуклидов в рыбе не обнаружено.

Поглощенные радионуклиды распределяются между органами и тканями гидробионтов [10]. Результаты анализа содержания радионуклидов в биологических системах организмов окуня и щуки приведены на рис. 2 и 3. Значения суммарной удельной бета-активности различных тканей и органов варьируются от 93,4 до 142,1 Бк/кг для мышечной ткани, от 94,5 до 151,8 Бк/кг для костной ткани, от 41,6 до 101,1 Бк/кг для смеси кожи, чешуи и плавников, от 48,2 до 79,9 Бк/кг для внутренностей и от 55,1 до 96,9 Бк/кг для голов (см. табл. 1). Наибольшее накопление бета-активных радионуклидов в пересчете на массу выявлено для мышечной ткани рыбы (49—51%), отобранной из Неси (см. рис. 2 и 3). В [9] показано, что наибольшие значения суммарной бета-активности рыб Днепропетровского водохранилища выявлены в костях (до 363,13 Бк/кг) и в мышцах (до 252,43 Бк/кг).

Удельное содержание изотопа Cs-137 в организменных биологических системах находится в следующих интервалах активности: от МИА до

19,5 Бк/кг для мышечной ткани, от МИА до 17,9 Бк/кг для костной ткани, от МИА до 14,8 Бк/кг для смеси кожи, чешуи и плавников, от МИА до 6,85 Бк/кг для внутренностей и от МИА до 9,38 Бк/кг для голов. Для рыбы из Неси максимальные концентрации Cs-137 (29—55%) наблюдаются в мышечной ткани, в костной ткани содержание лишь немногим меньше (16—26%). Приоритетное накопление изотопа Cs-137 в мышцах рыб также отмечено в литературе [14; 18—20]. Как указано в [10], 88% изотопа Cs-137 накапливается в мышечной ткани, 8% — в костной ткани и менее 3% — в печени.

Удельная активность изотопа Sr-90 ниже МИА для мышечной ткани, для костной ткани и для внутренностей. Для кожи, чешуи, плавников активность Sr-90 находилась в диапазоне от МИА до 21,67 Бк/кг, для голов — от МИА до 12,84 Бк/кг. Наибольшее накопление данного изотопа выявлено для окуня из Неси, а именно для смеси кожи, чешуи и плавников (47%) и для голов (33%). Характер приоритетного накопления Sr-90 в несъедобной части рыбы также подтверждается данными проведенных ранее исследований [9; 18; 19]. Так, в [10] отмечается, что 64% изотопа Sr-90 накапливается в костных тканях, 27% — в мышечной ткани и около 2% в печени. Также в тканях рыб Самарского залива и Днепропетровского водохранилища наибольшие концентрации Sr-90 были определены для костной ткани (до 4,5 Бк/кг и до 3,80 Бк/кг соответственно) [21].

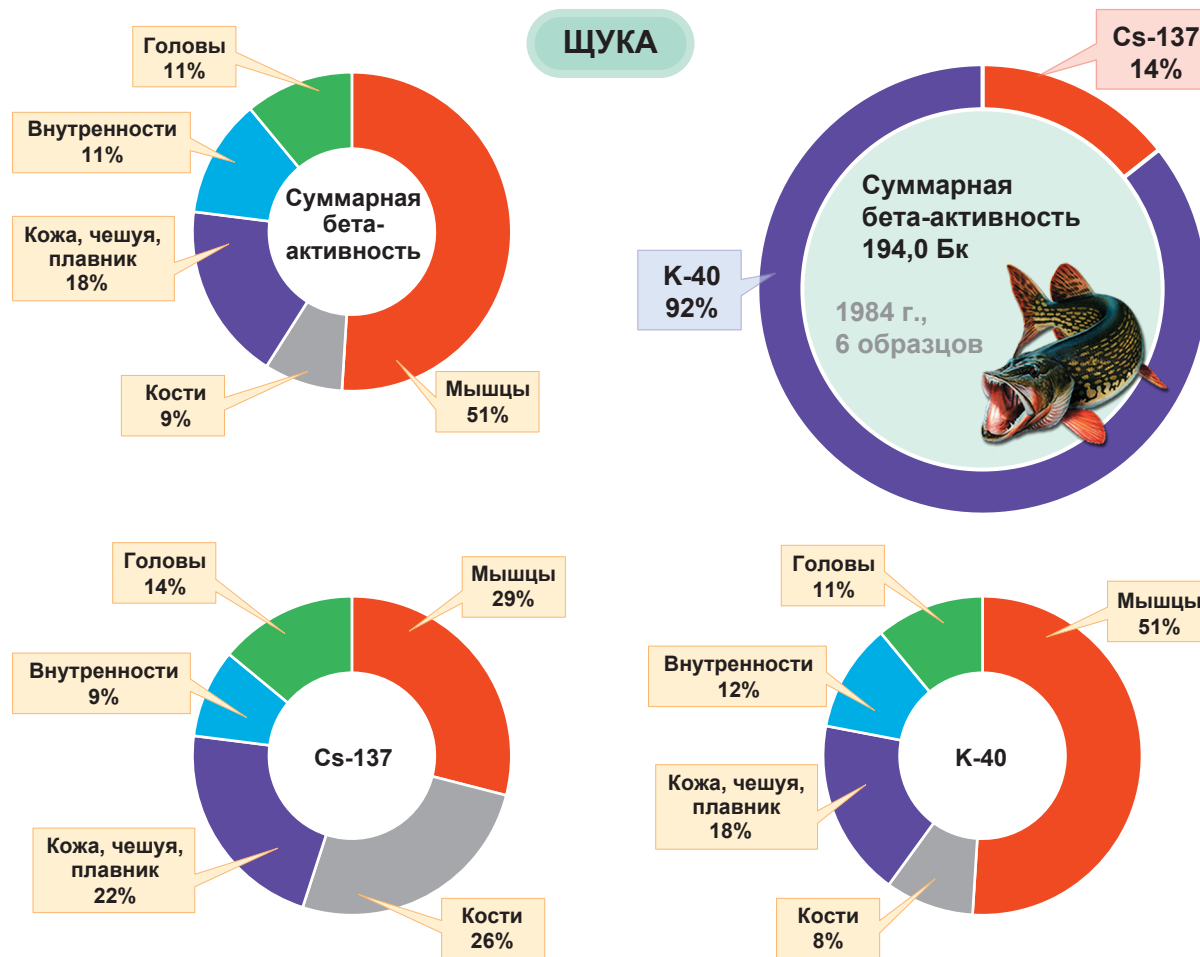


Рис. 3. Распределение радионуклидов по органам и тканям щуки с реки Несь (изображение щуки взято из интернет-ресурсов)
Fig. 3. Distribution of radionuclides in organs and tissues of pike from the Nes River (Pike image is taken from Internet resources)

Удельная активность изотопа К-40 варьирует в пределах от 94,3 до 136,2 Бк/кг для мышечной ткани, от 91,3 до 131,3 Бк/кг для костной ткани, от 38,2 до 86,0 Бк/кг для смеси кожи, чешуи и плавников, от 44,4 до 173,6 Бк/кг для внутренностей и от 51,0 до 70,1 Бк/кг для голов. Наибольшее накопление К-40 выявлено для мышечной ткани рыбы из Неси (46% для окуня и 51% для щуки). По литературным данным, в рыбе из Днепропетровского водохранилища наибольшее накопление К-40 происходит в костной ткани (до 101,8 Бк/кг) и жабрах (до 117,4 Бк/кг), а в Самарском заливе наибольшее содержание К-40 зарегистрировано в мышцах (до 134,50 Бк/кг) и в костной ткани (до 114,30 Бк/кг) рыбы [21].

Отношение активностей Sr-90 и Cs-137 в цельных образцах рыбы из Неси составило 1,97 для окуня и 0,27 для щуки (табл. 2). Для органов и тканей рыбы это отношение находится в интервале от 0,07 до 10,8. Так, отношение активностей Sr-90 и Cs-137 в глобальных выпадениях оценивается примерно в 0,6 [18]. По литературным данным, отношение Sr-90 и Cs-137 у рыб Припяти составляло

0,06—0,52. В некоторых водоемах вблизи Чернобыльской атомной электростанции соотношение Sr-90 и Cs-137 для промысловых видов рыб достигало 1,78—50,00, тогда как у хищных рыб — 0,38—2,11 [19]. Полученные результаты показывают, что значения отношения активностей Sr-90 и Cs-137 имеют широкий диапазон и не позволяют выявить источник загрязнения исследуемых рек. Единственным предположением, позволяющим объяснить наличие искусственных радионуклидов в рыбе Неси, является возможный радиоактивный след, возникший при ядерных испытаниях на архипелаге Новая Земля [4].

Высокое содержание радионуклидов в рыбе может негативно сказаться на здоровье человека при ее потреблении [3]. Имеются данные, что при непрерывном воздействии на организм ионизирующего излучения от распада поступивших радионуклидов могут возникнуть генетические мутации, повышается риск развития рака в костях и живых тканях, происходит поражение пищеварительной и дыхательной систем [22—25]. Вследствие этого необходимо провести оценку потенциальной опасности изучаемой рыбы для населения.

Таблица 2. Изотопные отношения активностей Sr-90 и Cs-137 в рыбе из реки Несь

Органы, ткани	Изотопное отношение активностей Sr-90 и Cs-137, отн. ед.	
	Окунь	Щука
Образцы целиком	1,97	0,27
Мышечная ткань	0,27	0,07
Костная ткань	0,64	0,44
Кожа, чешуя, плавник	10,8	0,49
Внутренности	1,42	0,14
Голова	4,47	0,83

В соответствии с гигиеническими требованиями [26] допустимые уровни удельной активности изотопов в рыбе, используемой для пищевых целей, ограничиваются значениями в 100 Бк/кг для Sr-90 и 130 Бк/кг для Cs-137. Полученные данные свидетельствуют, что вся исследуемая рыба на территории северо-западной части арктического региона России пригодна для потребления.

Опрос населения, проживающего у рек Ненецкого автономного округа, выявил, что в среднем местный житель потребляет около 220 г рыбы в день (80,3 кг/год). Высокий уровень потребления рыбы связан тем, что там основным источником питания являются рыболовный промысел и охота. На основе этих данных были получены следующие значения пероральной дозы радионуклидов из рыбы до разделения на органы и ткани: 0,079 мЗв/год для окуня и 0,065 мЗв/год для щуки. Выявленная годовая пероральная доза ниже установленного предела 1 мЗв/год [27], ниже средней дозы облучения в 0,29 мЗв/год, полученной на душу населения в мире при попадании естественных радионуклидов в пищу [12], а также ниже предела дозы в 0,25—0,40 мЗв/год, рекомендованного Всемирной организацией здравоохранения [28]. В результате можно сделать вывод, что выявленные уровни повышенного содержания радиоизотопов в рыбе из Неси не представляют значимого риска для местного населения.

Заключение

В результате исследований, проведенных на территориях северо-западного сектора российской Арктики, выявлено наличие техногенных радионуклидов Cs-137 и Sr-90 в окуне и щуке в реке Несь Ненецкого автономного округа. В то же время в гидробионтах рек Мезень и Печора не обнаружено техногенных радионуклидов. Анализ биологических систем речного окуня и щуки показал

накопление Cs-137 в мышечной ткани у речного окуня (55% общей активности радионуклида), в мышечной и костной ткани у щуки (29% и 26% соответственно), а Sr-90 — в смеси кожи, чешуи и плавников (47%) и голов (33%). Установлено, что основным дозообразующим радионуклидом в рыбе оказался природный радионуклид K-40, содержание которого превышает 86% общей активности бета-излучающих радионуклидов. Предположением, позволяющим объяснить наличие искусственных радионуклидов в гидробионтах Неси, является возможный радиоактивный след, возникший при ядерных испытаниях на архипелаге Новая Земля. Выявленные уровни повышенной радиоактивности в рыбе из Неси не представляют значительного риска для здоровья местного населения. Проведенная научная работа позволила инициировать комплексные радиозоологические исследования слабо изученных тундровых территорий российской Арктики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 22-27-20079 «Радионуклиды в экосистемах тундры: источники, уровни загрязнения, антропогенные механизмы трансформации (на примере Ненецкого автономного округа)».

Литература

1. Carvalho F. P., Oliveira J. M., Malta M. Radionuclides in deep-sea fish and other organisms from the north Atlantic Ocean // ICES J. of Marine Science. — 2011. — Vol. 68, iss. 2. — P. 333—340. — DOI: 10.1093/icesjms/fsq088.
2. Milenkovic B., Stajic J. M., Stojic N. et al. Evaluation of heavy metals and radionuclides in fish and seafood products // Chemosphere. — 2019. — Vol. 229. — P. 324—331. — DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.04.189 0045-6535.
3. Adeleye M. O., Oyebanjo O., Gbenu S. T. et al. Activity concentration of natural radionuclides and assessment of the associated radiological hazards in the marine croaker (*pseudotolithus typus*) fish from two coastal areas of Nigeria // The Scientific World J. — 2020. — Vol. 15, iss. 2.
4. Friedlander B. R., Gochfeld M., Burger J. et al. Radionuclides in the marine environment: a CRESO science review // Amchitka Independent Science Assessment: Biological and Geophysical Aspects of Potential Radionuclide Exposure in the Amchitka Marine Environment. Consortium for Risk Evaluation with Stakeholder Participation / Eds. C. W. Powers, J. Burger, D. Kosson et al. — Piscataway, New Jersey: IEEE Access, 2005. — P. 1—95.
5. Livingston H. D., Povinec P. P. A Millennium Perspective on the Contribution of Global Fallout Radionuclides to Ocean Science // Health Physics. — 2002. — Vol. 82. — P. 656—668. — DOI: 10.1097/00004032-200205000-00012.

6. Abdullah A., Hamzah Z., Saat A. et al. Accumulation of radionuclides in selected marine biota from Manjung coastal area // AIP Conference Proceedings. — 2015. — Vol. 1659. — 050009. — DOI: 10.1063/1.4916879.
7. Adel M., Copat C., Saeidi M. R. et al. Bioaccumulation of trace metals in banded Persian bamboo shark (*Chiloscyllium arabicum*) from the Persian Gulf: a food safety issue // Food and Chemical Toxicology. — 2018. — Vol. 113. — P. 198—203. — DOI: 10.1016/j.fct.2018.01.027.
8. Трапезников А. В., Трапезникова В. Н., Коржавин А. В. и др. Основные принципы оценки безопасности рыбной продукции из водоемов, подверженных воздействию предприятий ядерного топливного цикла // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. — 2019. — № 1. — С. 106—114. — DOI: 10.25016/2541-7487-2019-0-1-106-114.
9. Hubanova N., Horchanok A., Novitskii R. et al. Accumulation of radionuclides in Dnipro reservoir fish // Ukrainian J. of Ecology. — 2019. — Vol. 9, iss. 2. — P. 227—231.
10. Bezhenar R., Kim K. O., Maderich V. et al. Multi-compartment kinetic-allometric model of radionuclide bioaccumulation in marine fish // Biogeosciences. — 2021. — Vol. 18. — P. 2591—2607. — DOI: 10.5194/bg-18-2591-2021.
11. Mito K., Nishimura A., Yanagimoto T. Ecology of groundfishes in the eastern Bering Sea, with emphasis on food habits // Dynamics of the Bering Sea. — Alaska: Univ. of Alaska, Fairbanks. Sea Grant, 1999. — P. 537—580.
12. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly with Annexes / UNSCEAR. — New York: United Nations, 2000. — 659 p.
13. Fakhri Y., Sarafraz M., Pilevar Z. et al. The concentration and health risk assessment of radionuclides in the muscle of tuna fish: A worldwide systematic review and meta-analysis // Chemosphere. — 2022. — Vol. 289. — P. 133—149. — DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.133149.
14. Zotina T. A., Trofimova E. A., Dementyev D. V. Time-dependent trends of artificial radionuclides in biota of the Yenisei River (Siberia, Russia) // J. of Environmental Radioactivity. — 2019. — Vol. 208—209. — С. 1—14. — DOI: 10.1016/j.jenvrad.2019.106028.
15. Radiological assessment of coastal marine sediment and water samples, Karachi Coast, Pakistan / IAEA. IAEA-Research Contract PAK8127. Radiation and Isotope Application Division. — Pakistan: Pakistan Inst. of Nuclear Science & Technology, 1999.
16. Пучков А. В., Яковлев Е. Ю., Дружинин С. В. Радиационные параметры гидробионтов условно чистой территории Ненецкого автономного округа // Успехи соврем. естествознания. — 2020. — № 6. — С. 118—122.
17. Age-dependent doses to the Members of the public from intake of radionuclides. — Pt. 5: Compilation of ingestion and inhalation coefficients // Ann. ICRP. — 1996. — Vol. 26, iss. 1. — P. 1—91. — DOI: 10.1016/S0146-6453(00)89192-7. — (ICRP Publication 72).
18. Miki S., Fujimoto K., Shigenobu Y. et al. Concentrations of ^{90}Sr and $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ activity ratios in marine fishes after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident // Fisheries Oceanography. — 2017. — Vol. 26, iss. 2. — P. 221—233. — DOI: 10.1111/fog.12182.
19. Kaglyan A. Ye., Gudkov D. I., Klenus V. G. et al. Radionuclides in fish of the Chernobyl exclusion zone: species-specificity, seasonality, size- and age-dependent features of accumulation // Radiation and Applications. — 2016. — Vol. 1, iss. 2. — P. 110—113. — DOI: 10.21175/Radj.2016.02.020.
20. Povinec P. P., Hirose K. Fukushima radionuclides in the NW Pacific, and assessment of doses for Japanese and world population from ingestion of seafood // Scientific Reports. — 2015. — Vol. 5. — 9016. — DOI: 10.1038/srep09016.
21. Ananieva T., Shapovalenko Z. The contents of artificial and natural radionuclides in tissues of the Percidae fish from the Dnipro Reservoir // Ukrainian J. of Ecology. — 2019. — Vol. 9, iss. 3. — P. 304—308.
22. Fasae K. P., Isinkaye M. O. Radiological risks assessment of ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K in fish feeds and catfish samples from selected fish farms in Ado-Ekiti, Nigeria // J. of Radiation Research and Applied Sciences. — 2018. — Vol. 11. — P. 317—322. — DOI: 10.1016/j.jrras.2018.05.002.
23. Orosun M. M., Adisa A. A., Akinyose F. C. et al. Measurement of Natural Radionuclides Concentration and Radiological Impact Assessment of Fish Samples from Dadin Kowa Dam, Gombe State Nigeria // African J. of Medical Physics. — 2018. — Vol. 1, iss. 1. — P. 25—35.
24. Burger A., Lichtscheidl I. Strontium in the environment: review about reactions of plants towards stable and radioactive strontium isotopes // Science of The Total Environment. — 2019. — Vol. 653. — P. 1458—1512. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.312.
25. Lee S., Oh J., Lee K. et al. Evaluation of abundance of artificial radionuclides in food products in South Korea and sources // J. of Environmental Radioactivity. — 2018. — Vol. 184. — P. 46—52. — DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.01.008.
26. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. — М.: АСТ, 2001. — 269 с.
27. Kryshev A. I., Sazykina T. G., Katkova M. N. et al. Modelling the radioactive contamination of commercial fish species in the Barents Sea following a hypothetical short-term release to the Stepovogo Bay of Novaya Zemlya // J. of Environmental Radioactivity. — 2022. — Vol. 244—245. — DOI: 10.1016/j.jenvrad.2022.106825.
28. The International Food Safety Authorities Network (INFOSAN), World Health Organization Food and Agriculture Organization progress report 2004—2010. — Geneva: United Nations, 2011. — 24 p.

Информация об авторах

Пучков Андрей Викторович, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163000, Россия, Архангельск, наб. Северной Двины, д. 109), e-mail: andrey.puchkov@fciarctic.ru.

Дружинина Анна Сергеевна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163000, Россия, Архангельск, наб. Северной Двины, д. 109), e-mail: annadruzhinina27@yandex.ru.

Яковлев Евгений Юрьевич, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией экологической радиологии, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163000, Россия, Архангельск, наб. Северной Двины, д. 109), e-mail: evgeny.yakovlev@fciarctic.ru.

Дружинин Сергей Валериевич, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163000, Россия, Архангельск, наб. Северной Двины, д. 109), e-mail: druzhininserg@yandex.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Пучков А. В., Дружинина А. С., Яковлев Е. Ю., Дружинин С. В. Накопление радионуклидов в рыбе из рек северо-западного сектора российской Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 1. — С. 127—137. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-127-137.

ACCUMULATION OF RADIONUCLIDES IN FISH FROM THE RIVERS OF THE NORTHWESTERN SECTOR OF THE RUSSIAN ARCTIC

Puchkov, A. V., Druzhinina, A. S., Yakovlev, E. Yu., Druzhinin, S. V.

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russian Federation)

The article was received on 23 August, 2022

Abstract

The article presents the analysis of the radionuclide content in fish (perch — *Perca fluviatilis* L., pike — *Esox Lucius* L.) living in the rivers (Mezen, Nes and Pechora) of the northwestern sector of the Arctic zone of Russia. In one of the rivers of the study region (the Nes River in the Nenets Autonomous Area), the researchers have revealed the presence of technogenic radionuclides Cs-137 and Sr-90. To assess the distribution of these radionuclides in the fish body, they divided the selected fish samples into separate biological systems: muscle tissue, bone tissue, heads, entrails, a mixture of skin, scales and fins. The largest amount of Cs-137 is contained in the fish muscle tissue (more than 50% of the total radionuclide activity). The greatest amount of Sr-90 is contained in a mixture of skin, scales, fins (47%) and heads (33%) of river perch, while this radionuclide is absent in pike samples. There is a small content of Sr-90 in the bone tissue of river perch. In the absence of other technogenic short-lived radionuclides, the likely reason for the presence of Cs-137 and Sr-90 in the fish of the Nes River is a radioactive trace that appeared during nuclear tests on the Novaya Zemlya archipelago. The main dose-forming radionuclide in the selected fish samples was natural K-40. Its content for pike is estimated at 92% of the total beta activity, for river perch — 86%. The main content of this radionuclide falls on muscle tissue (about 50% for

pike and river perch). According to the research results, it is noted that the levels of radioactivity in fish from the Nes River do not exceed the sanitary and hygienic standards established in the Russian Federation in the field of food safety and do not pose a significant radiological risk to the population.

Keywords: Arctic, fish, radionuclides, Cs-137, Sr-90, K-40.

The Russian science Foundation supported the research within the framework of project No. 22-27-20079 “Radionuclides in tundra ecosystems: sources, pollution levels, mechanisms of anthropogenic transformation (for example, the Nenets Autonomous Area)”.

References

1. *Carvalho F. P., Oliveira J. M., Malta M.* Radionuclides in deep-sea fish and other organisms from the north Atlantic Ocean. *ICES J. of Marine Science*, 2011, vol. 68, iss. 2, pp. 333—340. Available at: <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsq088>.
2. *Milenkovic B., Stajic J. M., Stojic N. et al.* Evaluation of heavy metals and radionuclides in fish and seafood products. *Chemosphere*, 2019, vol. 229, pp. 324—331. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.189> 0045-6535.
3. *Adeleye M. O., Oyebanjo O., Gbenu S. T. et al.* Activity concentration of natural radionuclides and assessment of the associated radiological hazards in the marine croaker (*pseudotolithus typus*) fish from two coastal areas of Nigeria. *The Scientific World J.*, 2020, vol. 15, iss. 2.
4. *Friedlander B. R., Gochfeld M., Burger J. et al.* Radionuclides in the marine environment: a CRESO science review. Amchitka Independent Science Assessment: Biological and Geophysical Aspects of Potential Radionuclide Exposure in the Amchitka Marine Environment. Consortium for Risk Evaluation with Stakeholder Participation. Eds. Powers C. W., Burger J., Kosson D., Gochfeld M., Barnes D. Piscataway, New Jersey, IEEE Access, 2005, pp. 1—95.
5. *Livingston H. D., Povinec P. P.* A Millennium Perspective on the Contribution of Global Fallout Radionuclides to Ocean Science. *Health Physics*, 2002, vol. 82, pp. 656—668. Available at: <https://doi.org/10.1097/00004032-200205000-00012>.
6. *Abdullah A., Hamzah Z., Saat A. et al.* Accumulation of radionuclides in selected marine biota from Manjung coastal area. AIP Conference Proceedings, 2015, vol. 1659, 050009. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.4916879>.
7. *Adel M., Copat C., Saeidi M. R. et al.* Bioaccumulation of trace metals in banded Persian bamboo shark (*Chiloscyllium arabicum*) from the Persian Gulf: a food safety issue. *Food and Chemical Toxicology*, 2018, vol. 113, pp. 198—203. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.01.027>.
8. *Trapeznikov A. V., Trapeznikova V. N., Korzhavin A. V. et al.* Basic principles for assessing the safety of fish products from the ponds exposed to the influence of nuclear fuel cycle enterprises. *Mediko-biologicheskiye i sotsial'no-psikhologicheskiye problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh situatsiyakh*, 2019, no. 1, pp. 106—114. Available at: <https://doi.org/10.25016/2541-7487-2019-0-1-106-114>. (In Russian).
9. *Hubanova N., Horchanok A., Novitskii R. et al.* Accumulation of radionuclides in Dnipro reservoir fish. *Ukrainian J. of Ecology*, 2019, vol. 9, iss. 2, pp. 227—231.
10. *Bezhenar R., Kim K. O., Maderich V. et al.* Multi-compartment kinetic-allometric model of radionuclide bioaccumulation in marine fish. *Biogeosciences*, 2021, vol. 18, pp. 2591—2607. Available at: <https://doi.org/10.5194/bg-18-2591-2021>.
11. *Mito K., Nishimura A., Yanagimoto T.* Ecology of groundfishes in the eastern Bering Sea, with emphasis on food habits. *Dynamics of the Bering Sea*. Alaska. Univ. of Alaska, Fairbanks, Sea Grant, 1999, pp. 537—580.
12. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly with Annexes. UNSCEAR. New York, United Nations, 2000, 659 p.
13. *Fakhri Y., Sarafraz M., Pilevar Z. et al.* The concentration and health risk assessment of radionuclides in the muscle of tuna fish: A worldwide systematic review and meta-analysis. *Chemosphere*, 2022, vol. 289, pp. 133—149. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133149>.
14. *Zotina T. A., Trofimova E. A., Dementyev D. V.* Time-dependent trends of artificial radionuclides in biota of the Yenisei River (Siberia, Russia). *J. of Environmental Radioactivity*, 2019, vol. 208—209, pp. 1—14. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106028>.
15. Radiological assessment of coastal marine sediment and water samples, Karachi Coast, Pakistan. IAEA. IAEA-Research Contract PAK8127. Radiation and Isotope Application Division. Pakistan, Pakistan Inst. of Nuclear Science & Technology, 1999.
16. *Puchkov A. V., Yakovlev E. Yu., Druzhinin S. V.* Radiation parameters of hydrobionts of conditionally clean territory of the Nenets Autonomous Okrug. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, 2020, no. 6, pp. 118—122. (In Russian).
17. Age-dependent doses to the Members of the public from intake of radionuclides. Pt. 5. Compilation of ingestion and inhalation coefficients. ICRP Publication 72. Ann. ICRP, 1996, vol. 26, iss. 1, pp. 1—91. Available at: [https://doi.org/10.1016/s0146-6453\(00\)89192-7](https://doi.org/10.1016/s0146-6453(00)89192-7). (ICRP Publication 72).
18. *Miki S., Fujimoto K., Shigenobu Y. et al.* Concentrations of ^{90}Sr and $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ activity ratios in marine fish-

- es after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *Fisheries Oceanography*, 2017, vol. 26, iss. 2, pp. 221—233. Available at: <https://doi.org/10.1111/fog.12182>.
19. Kaglyan A. Ye., Gudkov D. I., Klenus V. G. et al. Radionuclides in fish of the Chernobyl exclusion zone: species-specificity, seasonality, size- and age-dependent features of accumulation. *Radiation and Applications*, 2016, vol. 1, iss. 2, pp. 110—113. Available at: <https://doi.org/10.21175/RadJ.2016.02.020>.
20. Povinec P. P., Hirose K. Fukushima radionuclides in the NW Pacific, and assessment of doses for Japanese and world population from ingestion of seafood. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, 9016. Available at: <https://doi.org/10.1038/srep09016>.
21. Ananieva T., Shapovalenko Z. The contents of artificial and natural radionuclides in tissues of the Percidae fish from the Dnipro Reservoir. *Ukrainian J. of Ecology*, 2019, vol. 9, iss. 3, pp. 304—308.
22. Fasae K. P., Isinkaye M. O. Radiological risks assessment of ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K in fish feeds and catfish samples from selected fish farms in Ado-Ekiti, Nigeria. *J. of Radiation Research and Applied Sciences*, 2018, vol. 11, pp. 317—322. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2018.05.002>.
23. Orosun M. M., Adisa A. A., Akinyose F. C. et al. Measurement of Natural Radionuclides Concentration and Radiological Impact Assessment of Fish Samples from Dadin Kowa Dam, Gombe State Nigeria. *African J. of Medical Physics*, 2018, vol. 1, iss. 1, pp. 25—35.
24. Burger A., Lichtscheidl I. Strontium in the environment: review about reactions of plants towards stable and radioactive strontium isotopes. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 653, pp. 1458—1512. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.312>.
25. Lee S., Oh J., Lee K. et al. Evaluation of abundance of artificial radionuclides in food products in South Korea and sources. *J. of Environmental Radioactivity*, 2018, vol. 184, pp. 46—52. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.01.008>.
26. SanPiN 2.3.2.1078-01. Hygienic Requirements for Food Safety and Nutritional Value of Food Products. State Sanitary Rules and Regulations. Moscow, AST, 2001, 269 p. (In Russian).
27. Kryshev A. I., Sazykina T. G., Katkova M. N. et al. Modelling the radioactive contamination of commercial fish species in the Barents Sea following a hypothetical short-term release to the Stepovogo Bay of Novaya Zemlya. *J. of Environmental Radioactivity*, 2022, vol. 244—245. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106825>.
28. The International Food Safety Authorities Network (INFOSAN), World Health Organization Food and Agriculture Organization progress report 2004—2010. Geneva, United Nations, 2011, 24 p.

Information about the authors

Puchkov, Andrey Viktorovich, Junior Researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (109, Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163000, Russia), e-mail: andrey.puchkov@fciarctic.ru.

Druzhinina, Anna Sergeevna, PhD of Chemistry, Senior Researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (109, Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163000, Russia), e-mail: annadruzhinina27@yandex.ru.

Yakovlev, Evgeny Yurievich, PhD of Geology and Mineralogy, Head of the Laboratory of Ecological Radiology, Leading Researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (109, Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163000, Russia), e-mail: evgeny.yakovlev@fciarctic.ru.

Druzhinin, Sergey Valerievich, Researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (109, Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163000, Russia), e-mail: druzhininserg@yandex.ru.

Bibliographic description of the article

Puchkov, A. V., Druzhinina, A. S., Yakovlev, E. Yu., Druzhinin, S. V. Accumulation of radionuclides in fish from the rivers of the northwestern sector of the Russian Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2023, vol. 13, no. 1, pp. 127—137. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-127-137. (In Russian).