

К вопросу устойчивости пресноводных водоемов Восточной Фенноскандии к отложению ^{137}Cs : радиологический аспект

Н. А. Бакунов¹, кандидат биологических наук,
Л. М. Саватюгин², доктор географических наук

Федеральное бюджетное государственное учреждение Российской Федерации
«Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург

Реконструирована радиоэкологическая ситуация на озерах Восточной Фенноскандии при загрязнении их ^{137}Cs , определены уровни допустимого отложения ^{137}Cs на зеркало водоемов, при которых загрязнение рыб удовлетворяет требованиям санитарно-гигиенического норматива. Уровни ^{137}Cs прогнозировались в воде озер по сорбционно-диффузионной модели поглощения его отложениями дна, а объектов ихтиофауны – на основе зависимости накопления ^{137}Cs рыбой от концентрации в воде калия. Результаты реконструкции уровней ^{137}Cs верифицировались по натурным наблюдениям за глобальным и «чернобыльским» ^{137}Cs в объектах мониторинга. Коэффициенты накопления (КН) ^{137}Cs хищным видом рыбы из озерных вод изменялись от 840 до 16 210. Коэффициенты переноса (КП) «чернобыльского» ^{137}Cs в рыбу составили $5,0 \cdot 10^{-3} - 137 \cdot 10^{-3}$ Бк $\text{кг}^{-1}/\text{Бк} \cdot \text{м}^{-2}$. Для радиоэкологической оценки озер предложена шкала разграничения водоемов по КН ^{137}Cs рыбой на основе связи КН с содержанием в воде калия – химического аналога ^{137}Cs . Верхняя граница допустимого отложения ^{137}Cs на поверхность слабоминерализованных олиготрофных озер Восточной Фенноскандии находится в пределах 4–7 кБк/м².*

Ключевые слова: ^{137}Cs , коэффициент накопления, рыба, озера, трофическая цепь

Поступила в редакцию 31.01.13

Современное состояние реакторов эксплуатируемых АЭС не исключает маловероятного события запроектной аварии с выбросом искусственных радионуклидов (ИРН) в атмосферу и переносом их на значительные расстояния. Инцидент с реакторами АЭС «Фукусима-1» (Япония) в 2011 г., последовавший через 25 лет после аварии на Чернобыльской АЭС, напомнил о необходимости систематизации накопленных знаний по миграции ИРН в трофических цепях человека и животных.

В [1] нами на основе санитарно-гигиенического подхода выполнена оценка возможного предела загрязнения (ВПЗ) водоемов ^{90}Sr и ^{137}Cs для ограниченной группы населения Кольского полуострова, в рационе которой доминируют продукты из оленины и пресноводной рыбы. Отдаленные последствия

загрязнения «чернобыльским» ^{137}Cs озер Кольского полуострова прослеживаются по данным мониторинга ^{137}Cs в ихтиофауне и воде Ловозера и Вялозера, выполненного в 1998–1999 гг., спустя 12–13 лет после его поступления в водоемы [2, 3]. Содержание ^{137}Cs в хищных видах рыб из этих озер составило примерно 0,25–0,33 допустимого санитарного регламента [4] (СанПиН 2.3.2.1078-01), равного 130 Бк/кг.

Из-за низкого по сравнению со Швецией и Финляндией отложения «чернобыльского» ^{137}Cs на северо-западе России масштабный радиологический мониторинг ихтиофауны водоемов не проводился. В Швеции мониторинг пресноводной ихтиофауны проведен на 644, а в Финляндии на 52 озерах с плотностью отложения ^{137}Cs на водосборы от 4 до 67 кБк/м² [5, 6].

Радиационно-гигиенические и социально-экономические последствия для районов, находящихся на следах радиационных аварий, зависят не только от уровня отложения ИРН на поверхность земли, но и от природных особенностей загрязненных территорий, которые могут ослаблять или усиливать негативные последствия. Поэтому количественные

¹ e-mail: aaricoop@aari.ru

² e-mail: savat@aari.ru

* Восточная Фенноскандия – физико-географическая страна, включающая территории от Кольского полуострова (Россия) и Лапландии (Финляндия) на севере до Финского залива и Карельского перешейка на юге.

Таблица 1. ¹³⁷Cs в рыбах озер стран Скандинавии и Киевского водохранилища (Украина)

Год	Отложение ¹³⁷ Cs на водоемы, кБк/м ²	Выборка, число озер	¹³⁷ Cs в мышцах рыбы, Бк/кг	
			Окунь	Плотва/щука
Озера центральных районов Швеции [5]				
1987	5—85	150	4467	1759/2653
1988	5—85	40	6042	—/3753
Озера юга Финляндии [6]				
1987	4—67	44	2037	715/2677
1988	4—67	48	2087	586/1915
Киевское водохранилище [9]				
1987	Примерно 74	—	1658	—/1670
1988	Примерно 74	—	1700	—/1011

характеристики переноса ИРН по трофической цепи человека устанавливаются применительно к конкретным природным условиям проживания отдельных контингентов населения.

Уточнение этих характеристик переноса ИРН — один из этапов первоочередных работ в перечне мероприятий по ликвидации последствий радиационных аварий и минимизации ущерба от них. Поэтому за отложением «чернобыльского» ¹³⁷Cs на территорию скандинавских стран последовал масштабный мониторинг наземных и водных экосистем. Плотность отложения «чернобыльского» ¹³⁷Cs на почвенный покров в Швеции [5] составила 5—85 кБк/м², а в Финляндии — 4—67 кБк/м² [6]. В России на Кольском полуострове и в Карелии отложение ¹³⁷Cs [3, 7, 8] было менее 10 кБк/м². Здесь по сравнению с доаварийным уровнем запас ¹³⁷Cs в почвах увеличился в 1,5—2 раза.

Насколько важно учитывать влияние природных условий на аккумуляцию ¹³⁷Cs пресноводной ихтиофауны можно судить на основе сравнения контаминации «чернобыльским» ¹³⁷Cs рыб из водоемов скандинавских стран и Киевского водохранилища в 1987—1988 гг. Сравнимые водоемы по значению максимальной плотности отложения ¹³⁷Cs на зеркало вод близки (табл. 1).

Содержание ¹³⁷Cs в окуне и щуке Киевского водохранилища было соответственно в три и два раза меньше, чем в рыбах из озер Швеции и Финляндии. Применительно к российскому нормативу (СанПиН 2.3.2.1078-01) уровни ¹³⁷Cs в рыбе превышают регламент 130 Бк/кг. Озера юга Финляндии удалены от источника выброса ¹³⁷Cs (Чернобыльской АЭС)

примерно на 1200 км, тогда как верховье Киевского водохранилища — на 60 км.

Удаленность Финляндии и Швеции от источника выброса не послужила защитой от загрязнения ¹³⁷Cs ихтиофауны озер этих стран. Загрязнение ¹³⁷Cs рыб озер Швеции и Финляндии оказалось более высоким, несмотря на то что в Киевское водохранилище поступали воды Припяти и Днепра, загрязненные ¹³⁷Cs. Сочетание низкой минерализации вод озер скандинавских стран (менее 30—50 мг/л) с невысоким содержанием калия в воде (не более 1 мг/л) обусловили повышенное накопление ¹³⁷Cs в рыбах.

В постчернобыльский период (до 1990 г.) поступление ¹³⁷Cs с рыбой в рацион жителей Финляндии [10] составило 39% от общего, тогда как на продукты сельского хозяйства (молоко, мясо) приходилось 25%, а на зерно — 15%. Реакция ихтиофауны пресноводных озер на поступление «чернобыльского» ¹³⁷Cs была ожидаемой, так как при отложении глобального ¹³⁷Cs на территорию Восточной Финноскандии (1961—1964 гг.) в количестве примерно 3,7 кБк/м² в рыбах регистрировалось повышенное содержание радионуклида. В выборке из 10 озер Финляндии [11] уровни ¹³⁷Cs в мышцах рыб изменялись от 10 до 314 Бк/кг. В 4 озерах из 10 уровень ¹³⁷Cs был выше 130 Бк/кг.

Аналогичная ситуация отмечалась с загрязнением рыб в озерах Ленинградской и Новгородской областей [12]. В 1968 г. в мышцах рыб из озер Большое, Медвежье, Щучье и Черное содержалось 482, 348, 344 и 306 Бк/кг ¹³⁷Cs. В 1972 г. у хищных рыб из озер Онежское и Сямозеро еще сохранялось загрязнение ¹³⁷Cs на уровне 55 Бк/кг [13].

Задача исследований сводилась к реконструкции загрязнения вод озер и рыбы «чернобыльским» ^{137}Cs для установления уровней контаминации этих объектов, их радиологической значимости и проверки состояния научного знания о закономерностях поведения ^{137}Cs в экосистеме пресноводного водоема.

Объектами исследований являлись уровни загрязнения глобальным и «чернобыльским» ^{137}Cs водосборов озер, вод и рыб, обитающих в озерах Кольского полуострова, Карелии и сопредельной Финляндии как региона, близкого к ним по природным условиям.

На границе России с Финляндией встречаются пятна с загрязнением почвенного покрова «чернобыльским» ^{137}Cs менее 10 кБк/м² [7, 8]. Неопределенность с уровнями загрязнения «чернобыльским» ^{137}Cs вод озер и объектов ихтиофауны северо-западного региона послужила основанием к их реконструкции на основе устанавливаемых закономерностей загрязнения вод и рыбы этим радионуклидом. К верификации реконструкций уровней ^{137}Cs в объектах мониторинга были привлечены данные отдельных наблюдений [2, 3, 13—15] за содержанием ^{137}Cs в воде озер и рыбах Карелии и Кольского полуострова, а также материалы систематического радиоэкологического мониторинга ^{137}Cs в водоемах Финляндии [10, 16–17].

Плотность отложения глобального и «чернобыльского» ^{137}Cs на водосборы озер [7, 18] использована в качестве основного параметра реконструкции уровней ^{137}Cs в воде озер и характеристики переноса ^{137}Cs к объектам ихтиофауны. К реконструкции уровней ^{137}Cs в воде и рыбе привлекались сложившиеся представления о поведении ^{137}Cs в системе «вода—биота—грунты дна» и физико-химических механизмах, регулирующих процессы переноса ^{137}Cs между компонентами пресноводной экосистемы.

Реконструкция загрязнения ^{137}Cs компонентов пресноводной экосистемы озер (воды, рыбы) включала два этапа. На первом из них определялось загрязнение озерных вод ^{137}Cs на основе сорбционно-диффузионной модели поглощения радионуклида грунтами дна. В дальнейшем уточнялись связи накопления ^{137}Cs рыбой с гидрохимическим составом вод, решались вопросы прогноза загрязнения рыб и верификации результатов исследований.

Ранее [19, 20] было показано, что сорбционно-диффузионная модель поглощения радионуклида дном водоема применима к определениям ^{137}Cs в воде озер с замедленным обменом вод. Высокие коэффициенты распределения ^{137}Cs в системе «вода—взвесь, вода—грунты дна» до $n \cdot 10^4$ л/кг приводят к относительно быстрому поглощению из воды ^{137}Cs взвешенным веществом и донными отложениями. Кумулятивный запас ^{137}Cs на дне водоемов становится источником поступления радионуклида в придонные слои воды, а система «порывы растворов—грунты дна» — регулятором процес-

са становления псевдоравновесных концентраций ^{137}Cs в воде озер, нарушаемых естественной сменой водного режима водоемов (межень — паводок).

По модели [21] относительное изменение во времени концентрации радионуклида в водоеме зависит от средней глубины водоема и коэффициентов распределения ^{137}Cs в системе «вода—донные отложения» и диффузии в грунте:

$$U_t / U_0 = H / K_d \sqrt{\pi D t}, \quad (1)$$

где U_0 и U_t — концентрации ^{137}Cs в воде (исходная и на время t соответственно); H — средняя глубина водоема; D — коэффициент диффузии ^{137}Cs в донных отложениях; K_d — коэффициент распределения ^{137}Cs в системе «вода—донные отложения»; t — время экспозиции.

Выражение (1) отвечает условию больших времен сорбции радионуклида донными отложениями. В [21] предусмотрена процедура оценки времени, с наступлением которого минимизируется ошибка в определении U_t .

$$y^2 = K_d^2 D t / H^2, \quad (2)$$

Путем подстановки в выражение (2) разных отрезков времени t определяется величина показателя $y^2 \geq 10.5$, отвечающая основному условию применения формулы (1). Коэффициенты диффузии D и сорбции K_d ^{137}Cs для озер Карелии приняты равными $1,0 \cdot 10^{-7}$ см²/с и 4000 л/кг соответственно. Для субарктического озера Имандра величина K_d ^{137}Cs понижена до 3000 л/кг. Для озер Лужско-Валдайской возвышенности, привлеченных к проверке корректности расчетов по модели ^{137}Cs в воде, величина коэффициента D принята равной $2,0 \cdot 10^{-7}$ см²/с. Допускалось наличие более высокого значения коэффициента диффузии ^{137}Cs в донных отложениях, так как озера этого района за летний сезон накапливают тепло не только в воде, но и в отложениях дна [22].

В табл. 2 приведены результаты экспериментальных определений ^{137}Cs в воде озер [14—16, 23] и расчета, выполненного с использованием модели (1). Для сопоставления разных по морфогидрологическим характеристикам водоемов введена графа запаса ^{137}Cs в объеме вод на дату мониторинга.

Уровни глобального ^{137}Cs в воде озер (табл. 2) в 1968 г. изменялись от 6,7 до 18,5 Бк/м³. Применительно к приблизительно четырехлетней экспозиции глобального ^{137}Cs в озерах (1964—1968 гг.) его содержание в воде удовлетворительно рассчитывалось по модели: воспроизводились как низкие концентрации ^{137}Cs в озерах Чудско-Псковское, Плещеево, Имандра, так и более высокие уровни в Ругозере, Выгозере, Онежском озере. Глубоководное Онежское озеро в отличие от остальных более мелких озер в 1968 г. еще сохраняло в водной массе около 12% кумулятивного запаса глобального ^{137}Cs .

Таблица 2. Определение в воде озер глобального и «чернобыльского» ¹³⁷Cs при четырех- и двухлетней экспозиции в водоемах соответственно

Озеро	Характеристики озер			Запас ¹³⁷ Cs в воде, % отложения на водоем	¹³⁷ Cs (опыт)		¹³⁷ Cs в воде, расчет по модели, Бк/м ³
	S, км ²	H, м	V, км ³		в почве, кБк/м ²	в воде, Бк/м ³	
Глобальный ¹³⁷Cs (1964—1968 гг.) в озерах Северо-Запада России [14, 23]							
Ругозеро	11,0	2,5	0,027	1,0	3,7	17,4	14,8
Выгозеро	1140	6,2	7,1	2,5	3,7	14,8	14,4
Онежское	9890	30,0	297	12,0	4,6	18,5	18,1
Чудско-Псковское	3560	7,0	24,1	1,4	3,7	7,4	10,4
Ильмень	1100	2,6	2,85	0,8	3,7	11,8	10,4
Неро	53,8	1,5	0,073	0,4	3,7	11,1	11,5
Плещеево	50,8	11,2	0,56	2,8	3,7	9,3	10,7
Имандра *	816	10,3	11,8	2,6	3,7	7,5	6,7
«Чернобыльский» ¹³⁷Cs (1986—1988 гг.) в озерах Финляндии [16]							
Онтоярви	95	5,8	0,6	14,0	7,2	160	37
Конневеси	189	11,0	2,0	10,2	28,0	270	164
Кеуруселья	97	6,4	0,6	3,6	53,0	310	308
Пюкяярви	37	7,6	0,3	3,6	54,0	240	285
Нясиселья	93	15,0	1,4	8,1	52,0	280	290
Пяйянне (залив Асиккаланселья)	77	13,0	1,0	3,6	62,0	290	348

* Экспозиция 1964—1974 гг.

Загрязнения озер глобальным ¹³⁷Cs было растянуто во времени (1961—1964 гг.), тогда как «чернобыльским» стало моментальным для водоемов, не имевших на дату выпадений ледяного покрова. На 28—29 апреля 1986 г. только озера на юге Карелии (Россия) и Финляндии освободились ото льда. Озера Мурманской области и севера Карелии выше 64—65° с. ш. не имели открытых вод. Их загрязнение «чернобыльским» ¹³⁷Cs началось лишь после схода снежного покрова и таяния льда.

Сведения по загрязнению «чернобыльским» ¹³⁷Cs озер юга Финляндии (табл. 2) использованы нами при проверке прогностических возможностей моде-

ли (1) на относительно раннем этапе контаминации. Расчеты содержания ¹³⁷Cs в воде озер выполнены на второй год (в 1988 г.) после поступления в водоемы. Озера различались по показателям средней глубины, объему вод, трофии и плотности отложения ¹³⁷Cs на водосбор (7,2—62 кБк/м²).

Выпадения ¹³⁷Cs 28—29 апреля 1986 г. совпали по времени с паводковым режимом водоемов. Паводковые воды, обогащенные минеральной взвесью, сорбировали ¹³⁷Cs, а затем в процессе седиментации увлекли его на дно. Такой ситуационный момент способствовал ускорению очищения вод от ¹³⁷Cs. К ноябрю-декабрю 1986 г. во многих озерах

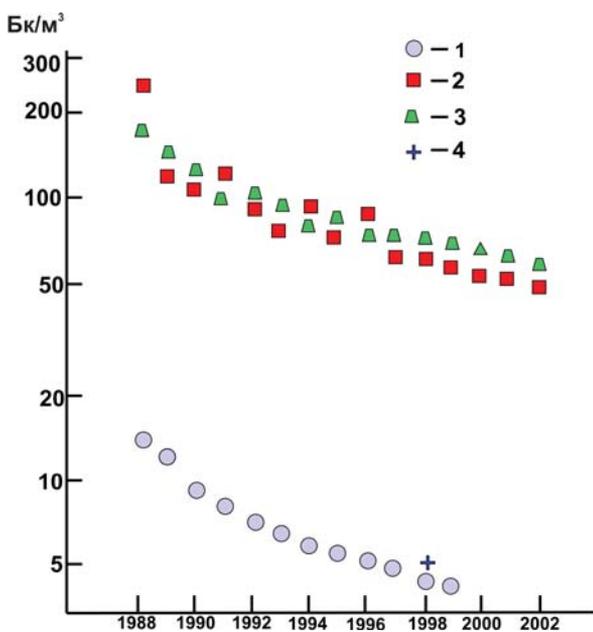


Рис. 1. Динамика уровней ¹³⁷Cs в воде озер Вялозеро (1 – расчет, 4 – наблюдение [2]) и Пяйянне (3 – расчет, 2 – наблюдение [17])

концентрация ¹³⁷Cs в воде понизилась в 10—30 раз по сравнению с маем этого года [16, 24].

Результаты расчетов уровней ¹³⁷Cs в воде озер юга Финляндии оказались близки к данным мониторинга (см. табл. 2) за исключением озера Онтоярви. Этот водоем расположен севернее других (64° с. ш.). К моменту выпадений ¹³⁷Cs на водосборе озера сохранялся снежный покров. Поступление ¹³⁷Cs в озеро с тальми водами стало дополнительным источником загрязнения водоема. В паводок озеро принимает воды из близлежащей водной системы Липари.

С отложением ¹³⁷Cs на снежный покров создаются предпосылки к загрязнению водоемов в период весеннего паводка. Такой канал загрязнения наиболее значим в первый год контаминации озер.

Различия между озерами юга Финляндии (см. табл. 2) по морфогидрологическим характеристикам не повлияли на оценки уровней «чернобыльского» ¹³⁷Cs в воде озер при двухлетней экспозиции радионуклида в водоеме. Через два и четыре года после поступления ¹³⁷Cs в водоемы Восточной Фенноскандии его уровень в воде озер корректно определяются с использованием сорбционно-диффузионной модели (1).

Для рек Финляндии нами по данным наблюдений 1978—1985 гг. были рассчитаны полупериоды очищения их вод от глобального ⁹⁰Sr [25], составившие 6,9—11,6 года. Очищение от ¹³⁷Cs вод рек Оулуйоки и Кюмийоки, вытекающих из больших и глубоких озер, характеризовалось полупериодами, равными

соответственно 6,5 и 7,5 года. Для Онежского озера [19] величина полупериода составила 8 лет. Эти значения полупериодов глобального ¹³⁷Cs правомерно рассматривать в качестве временного ориентира естественной дезактивации вод рек с питанием из больших озер.

К реконструкции динамики «чернобыльского» ¹³⁷Cs в воде озер привлечены водоемы Вялозеро, Ловозеро на Кольском полуострове и озеро Пяйянне (Финляндия) с близкими величинами средних глубин 7,5—10 м и замедленным обменом вод около 2,5—3 лет. Среди них только для озера Пяйянне [10] мониторинг ¹³⁷Cs был комплексным и долговременным. Определения «чернобыльского» ¹³⁷Cs в водоемах Вялозера и Ловозера относятся к 1998 г., т. е. спустя 12 лет после его поступления [2, 3].

Отложение «чернобыльского» ¹³⁷Cs на зеркало озер Ловозеро и Вялозеро составило 2,2 кБк/м² — величину, близкую к 60% запаса глобального ¹³⁷Cs. Кумулятивный запас ¹³⁷Cs (глобальный плюс «чернобыльский») в водной массе Ловозера и Вялозера на 1986 г. составил соответственно 0,444 и 0,229 ТБк. С динамикой изменений этого запаса ¹³⁷Cs связано формирование уровней загрязнения вод и объектов ихтиофауны.

Выпадение ¹³⁷Cs на финское озеро Пяйянне (его длина примерно 100 км) не было равномерным. На южный плес озера отложилось примерно 62 кБк/м² ¹³⁷Cs, а на северные районы — значительно меньше. На водосборе озера запас глобального ¹³⁷Cs, равный 1,8 кБк/м², многократно уступал запасу «чернобыльского» радионуклида [10, 16].

В расчетах по (1) для Ловозера, Вялозера коэффициенты K_d и D ¹³⁷Cs приняты равными 3500 л/кг и $1,0 \cdot 10^{-7}$ см²/с соответственно. Для озера Пяйянне, находящегося на юге Финляндии, значение K_d повышено до 4000 л/кг. Поскольку результаты расчета (1988—1998 гг.) концентраций ¹³⁷Cs в воде (Бк/м³) Вялозера и Ловозера оказались близки, динамика уровней ¹³⁷Cs в воде на рис. 1 приведена только для озер Пяйянне и Вялозеро. По опытным данным [2] в воде Вялозера (1998 г.) содержалось 4,5 Бк/м³ ¹³⁷Cs, а по расчету в 1997, 1998 и 1999 гг. — 4,70, 4,38 и 4,16 Бк/м³. Налицо корректность определения ¹³⁷Cs по формуле (1) на экспозицию радионуклида примерно в 12 лет. По-видимому, в условиях низкой температуры вод субарктических озер и невысокой скорости накопления осадков на дне котловин показатели миграции ¹³⁷Cs K_d и D сохраняют численные характеристики на значительном отрезке времени.

Верификация результатов расчета «чернобыльского» ¹³⁷Cs в воде озера Пяйянне проводилась по данным мониторинга радионуклида [26] в водах реки Кюмийоки, вытекающей из озера. Допускалось, что уровни ¹³⁷Cs в воде короткой реки близки к показателям озера. В 1988—1998 гг. экспериментальные значения уровней ¹³⁷Cs в воде (рис. 1) совпадают с расчетом. Однако к концу временного

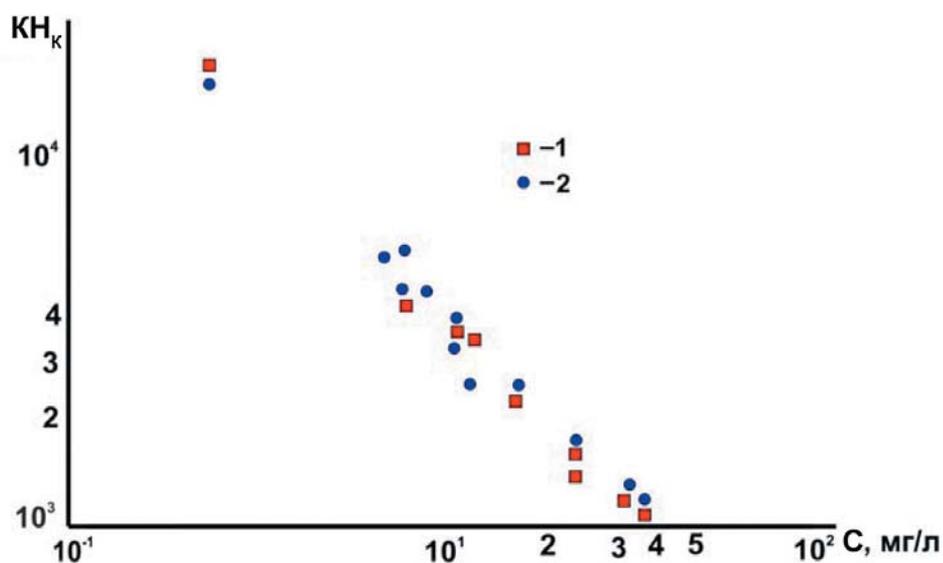


Рис. 2. КН калия в мышцах плотвы и окуня (1 – плотва, 2 – окунь), К, мг/л в воде озер

ряда (расчет) наблюдается тенденция к завышению уровня ^{137}Cs в воде. Такая ситуация, вероятнее всего, связана с уменьшением во времени содержания в донных грунтах подвижных химических форм ^{137}Cs , вовлекаемых в водную миграцию.

Отсутствие определений «чернобыльского» ^{137}Cs в водоемах Кольского полуострова и Карелии затрудняет проверку временных изменений уровней ^{137}Cs в воде озер. Сопоставление запасов «чернобыльского» ^{137}Cs на 1998 г. в объеме вод озер Вялозеро (0,8 км³) и Пяйянне (11 км³) со значениями на 1986 г. показало, что в водной массе озер содержится около 2% ^{137}Cs , поступившего в водоемы. Естественное очищение вод этих озер от ^{137}Cs (см. рис. 1) явно протекало при небольших различиях в скорости этого процесса. Снижение уровней ^{137}Cs в воде озер за 1988—1998 (2001) гг. характеризовалось полупериодом, близким к 6—7 годам. К последствиям естественного очищения вод озер от ^{137}Cs относится уменьшение загрязнения рыб.

Количественным показателем переноса радионуклида из водной среды в объекты ихтиофауны служит коэффициент накопления, равный отношению концентрации радионуклида в рыбе (Бк/кг) и в воде (Бк/л). Часто [27, 28] при изложении материалов КН радионуклида представляется относительной величиной (кратностью). Для водных экосистем реже, чем в случае сухопутных, применяется другой показатель миграции — коэффициент пропорциональности (КП) с размерностью Бк·кг⁻¹/Бк·м⁻². Первый показатель используется при изучении механизмов

миграции и трофических связей, тогда как второй привлекается к оценке контаминации продукции — пищевого сырья, получаемого с единицы площади (гектара, квадратного километра) загрязненных территорий.

Данных по КН ^{137}Cs пресноводными рыбами, обитающими в озерах с природными условиями, близкими к субарктическим водоемам (продолжительный ледостав, низкая температура вод, малое содержание солей, невысокая трофия), крайне мало.

Потребовался анализ влияния отдельных факторов на накопление ^{137}Cs рыбой и выделение среди них доминирующего, сохраняющего влияние на аккумуляцию ^{137}Cs при изменениях отдельных характеристик среды обитания рыб.

По направлению от Кольского полуострова к южным районам Карелии постепенно увеличивается минерализация поверхностных вод, среди озер уменьшается число олиготрофных водоемов, появляются озера эвтрофного типа. Эти изменения обусловлены сменой ландшафтных и климатических условий. Выходы на поверхность кристаллических пород, свойственные ландшафтам Кольского полуострова, к югу постепенно перекрываются чехлом четвертичных отложений, морено-ледниковый тип ландшафта становится доминирующим, заболоченность территорий возрастает до 10—14%. Глубокие и глубоководные озера этого региона по температурному режиму несущественно отличаются друг от друга [22]. В летний период эпилимнион у озер неустойчив и разрушается при сильных ветрах се-

Таблица 3. Динамика уровней ^{137}Cs в воде и пресноводной рыбе (результаты расчета)

Дата, год	^{137}Cs в воде, Бк/л	^{137}Cs в рыбе, Бк/кг массы мышц	
		Планктофаг	Хищник
Вялозеро. Концентрация калия в воде — 0,8 мг/л; КН ^{137}Cs — 3036 (планктофаг) и 8184 (хищник)			
1988	0,0136	41,3	111,3
1990	0,00909	27,6	74,4
1992	0,00713	21,5	58,3
1994	0,00591	17,9	48,4
1996	0,00507	15,4	41,5
1998	0,00438	13,3	36,0
Ловозеро. Концентрация калия в воде — 1,2 мг/л; КН ^{137}Cs — 2195 (планктофаг) и 5176 (хищник)			
1988	0,0136	31,1	70,9
1990	0,00909	20,3	47,9
1992	0,00713	15,4	36,4
1994	0,00591	13,0	30,7
1996	0,00507	11,4	26,9
1998	0,00438	9,4	22,1

верных румбов, вследствие чего в водоемах поддерживается низкая температура водных масс. Влияние температурного фактора на накопление ^{137}Cs рыбой известно для прудов-охладителей АЭС, где градиенты по температуре в воде являются значительными.

Аккумуляция ^{137}Cs пресноводной рыбой зависит от содержания солей в воде и концентрации калия — химического аналога ^{137}Cs . С увеличением минерализации вод и содержания в них калия снижается накопление ^{137}Cs [11, 12, 23, 27]. Однако насколько устойчива эта связь для водоемов с неодинаковыми химическим составом вод, температурными условиями, водным режимом, трофией и уровнями калия в воде, ясности нет. Если в озерах Кольского полуострова концентрация калия в воде изменяется от ультранизких 0,2—0,6 до примерно 2 мг/л, то на юге Карелии и на севере Ленинградской области уже встречаются водоемы с уровнями калия 4—6 мг/л и минерализацией вод до 70—100 мг/л [22, 29].

В основе подхода к прогнозу накопления ^{137}Cs рыбой лежит признание ведущей роли системы гомеостаза рыбы в регулировании усвоения калия и цезия, имеющих близкие химические свойства. В пресных водах концентрация калия изменяется от ультранизких величин (менее 0,5 мг/л) до повышенных

(примерно 100 мг/л), тогда как в мышцах рыбы его концентрация остается почти постоянной — 3000—3500 мг/кг. Жесткий контроль со стороны системы гомеостаза за поступлением калия в организм рыб должен распространяться и на его химический аналог ^{137}Cs . Поэтому между характеристиками накопления калия и ^{137}Cs пресноводной рыбой в принципе не может быть значительных (многократных) различий. В такой ситуации КН калия рыбой дает ориентир ожидаемых величин КН ^{137}Cs .

Применительно к выборке (рис. 2) из 9 и 16 озер [12], расположенных в интервале 58—60° с. ш. (Ленинградская и Псковская области), нами для плотвы и окуня были рассчитаны коэффициенты накопления химического элемента К рыбой с последующей аппроксимацией связи концентрации калия в воде и КН калия в рыбе степенной функцией:

$$\text{КН}_{\text{К(плотва)}} = 3816C^{-1,034}, \quad (3)$$

$$\text{КН}_{\text{К(окунь)}} = 3947C^{-0,995}, \quad (4)$$

где C — концентрация калия в водоеме, мг/л; числа в формулах — эмпирические коэффициенты.

Высокая теснота связи между параметрами

Таблица 4. Уровни ^{137}Cs в икhtiофауне Вялозера, Ловозера (Россия), озера Пяйянне (Финляндия) и показатели переноса его по цепи «вода—рыба»

Озеро, период наблюдений	Рыба	^{137}Cs Бк/ л, кг		КН ^{137}Cs	КП ^{137}Cs (10^{-3})
		в воде	рыба (мышцы)		
^{137}Cs в воде и рыбе из озер Кольского полуострова [2, 3]					
Вялозеро, 1998 * [2]	Окунь	0,0045	38,0	8440	17,3
	Налим	—	57	12670	25,9
	Щука	—	29	6440	13,2
	Язь	—	12,1	2670	5,5
	Плотва	—	11,9	2640	5,4
	Сиг	—	3,8	840	1,7
Ловозеро, 1998—1999 *[3]	Голец	0,0045	28	6220	12,7
	Щука	—	16	3550	7,3
	налим	—	12	2670	5,5
	Нумжа	—	16	3550	7,3
^{137}Cs в воде и рыбе из озер юга Финляндии [16]					
Онтоярви, 2000 **	Окунь	0,023	160	6960	31
Конневеси, 2000 **	Окунь	0,056	480	8570	24
Пяйянне, 2000 **	Окунь	0,034	300	8820	6,7
Пюхьярви, 2000 **	Окунь	0,029	100	3450	2,6
Вехьярви, 2003 **	Окунь	0,320	2900	9060	73
Сикьярви, 2003 **	Окунь	0,290	4700	16210	137

* Год наблюдений за уровнями ^{137}Cs в воде и рыбе.

** Год наблюдений за уровнями ^{137}Cs в рыбе, а в воде — интервал 2000—2003 гг.

($r = 0,99$) позволяет корректно рассчитывать КН калия рыбой.

К проверке тесноты связи между концентрацией калия в воде и КН калия в рыбе и сравнению расчетных значений КН калия с известными КН для ^{137}Cs привлечена независимая выборка данных из шести озер [23]. Для рыбы планктофага из этих озер имелись экспериментальные определения уровней калия и ^{137}Cs в рыбах. По формуле (3) для рыб были рассчитаны КН калия.

КН калия рыбой из Ругозера, Выгозера, Онежского, Чудского, Ильменя и Плещеева озер равнялись $6,4 \cdot 10^3$; $5,5 \cdot 10^3$; $4,8 \cdot 10^3$; $2,2 \cdot 10^3$; $1,5 \cdot 10^3$ и $1,5 \cdot 10^3$ единиц при содержании калия в воде 0,6; 0,7; 0,8, 1,8; 2,5 и 2,5 мг/л соответственно. Для рыб из этих озер

КН ^{137}Cs составили $3,8 \cdot 10^3$; $4,0 \cdot 10^3$; $2,4 \cdot 10^3$; $1,9 \cdot 10^3$; $1,1 \cdot 10^3$ и $1,2 \cdot 10^3$ единиц. Этот ряд экспериментальных величин КН ^{137}Cs рыбой незначительно отличается от аналогичного ряда КН калия, несмотря на четырехкратное различие между озерами по содержанию в них калия и пятикратное различие по минерализации вод. Однако в рассматриваемых рядах тенденция к более низким значениям КН рыбой ^{137}Cs , чем калия, выражена отчетливо. При переносе ^{137}Cs из воды к планктофагам происходит дискриминация ^{137}Cs относительно калия [12, 28] с коэффициентом дискриминации 0,4—0,9 при среднем 0,65.

Коррекция КН калия на величину коэффициента дискриминации приводит к значениям КН ^{137}Cs , близким к опытным: $4,2 \cdot 10^3$; $3,6 \cdot 10^3$; $3,1 \cdot 10^3$; $1,4 \cdot 10^3$;

Таблица 5. Разграничение субарктических озер по КН ^{137}Cs хищным и мирным видами рыб в зависимости от содержания в воде элемента калия

Калий в воде, мг/л	Накопление ^{137}Cs в мышцах ихтиофага		Накопление ^{137}Cs в мышцах планктофага	
	Степень накопления	КН *	Степень накопления	КН *
0,1—0,5	Очень высокое	85790—13920 (24792)	Очень высокое	16020—4420 (6650)
0,5—1,0	Высокое	13920—6360 (8803)	Высокое	4420—2540 (3200)
1,0—1,5	Среднее	6360—4020 (4942)	Средняя	2540—1840 (2120)
1,5—3,0	Ниже среднего	4020—1840 (2544)	Ниже среднего	1840—1050 (1330)
3,0—6,0	Низкое	1840—840 (1162)	Низкое	1050—600 (762)
Менее 6,0	Очень низкое	Менее 840	Очень низкое	Менее 600

* Расчет КН ^{137}Cs рыбой проведен для экстремумов уровня калия шкалы и среднего значения.

1,0·10⁵ и 1,0·10³ единиц. Таким образом, для озер с типичным для водоемов Кольского полуострова и Карелии содержанием калия в воде (0,6—2,5 мг/л) связь накопления ^{137}Cs рыбой и уровня калия в воде озер оказалась устойчивой.

В результате дальнейших исследований было признано целесообразным использовать приведенные ниже эмпирические зависимости (5) и (6) для расчетов КН ^{137}Cs рыбой из водоемов, расположенных выше 60° с. ш. — условной границы устойчивости гидрокарбонатной системы вод. В таких озерах еще не прослеживаются процессы декальцинации вод, а сами водные массы озер отличаются низкой минерализацией — менее 30—50 мг/л.

$$\text{КН}_{^{137}\text{Cs}(\text{планктофаг})} = 2540C^{-0,8}, \quad (5)$$

$$\text{КН}_{^{137}\text{Cs}(\text{хищник})} = 6360C^{-1,13}, \quad (6)$$

где C — концентрация калия в водоеме, мг/л; числа в формулах — эмпирические коэффициенты.

^{137}Cs относится к химическим элементам, миграция которых по пищевым цепям пресноводных озер сопровождается «эффектом трофических уровней». Поэтому хищные виды рыб накапливают ^{137}Cs в два-три раза больше мирных.

Расчеты по (1) уровней ^{137}Cs в воде Вялозера и Ловозера показали близкие значения концентраций, поэтому аккумуляция ^{137}Cs в рыбе озер (табл. 3) определялась содержанием калия в воде и видом рыбы.

Как уже указывалось, регламент загрязнения ^{137}Cs рыб по СанПиН 2.3.2.1078-01 равен 130 Бк/кг.

У хищников из Вялозера накопление ^{137}Cs в 1988 г. было близким к нормативу. Через год уровень ^{137}Cs в рыбе снизился, но еще составлял примерно половину величины санитарного регламента. На второй год после отложения ^{137}Cs на поверхность водоемов уровни ^{137}Cs в организме хищных видов рыб достигли максимальных значений. Затем следует этап постепенного снижения загрязнения рыб до наступления псевдоравновесных концентраций ^{137}Cs между компонентами пресноводной экосистемы («вода—биота—грунты дна»). Ситуация с загрязнением ^{137}Cs рыб Вялозера в 1988 г. и в последующие годы была благополучной, и не требовалось вводить ограничения на использование рыбы на пищевые цели по санитарным показаниям.

Иная радиэкологическая ситуация с загрязнением рыб ^{137}Cs складывалась на озерах с ультранизким содержанием калия в воде. Связь накопления ^{137}Cs рыбой с уровнем калия в воде озер носит степенной характер (5,6). Поэтому при переходе от водоемов с высоким (средним) содержанием калия в воде к низкому резко повышается накопление ^{137}Cs рыбой.

При уровне калия в воде 0,4 мг/л КН ^{137}Cs равен 17910 и 5287 единиц для хищных и мирных рыб соответственно. Для водоема с уровнем ^{137}Cs в воде, как у Вялозера, — 0,0136 Бк/л накопление мирными рыбами составит 71,9, а хищными — 244 Бк/кг мышц. У хищных рыб, обитающих в озерах с ультранизким уровнем калия, содержание ^{137}Cs в 1988 г. превышало санитарный регламент. При допущении снижения уровня ^{137}Cs в рыбе с полупериодом, рав-

ным трем годам [17], превышение регламента могло сохраняться до 1991 г.

Уровни калия в воде менее 0,5 мг/л типичны для озер горных систем, берега и дно которых имеют выходы кристаллических пород гранитов, гнейсов. В выборке из 12 озер Пудоранской озерной провинции [30] в 8 озерах сумма ионов натрия и калия была меньше 1,0 мг/л. В этой сумме ионов доля калия колеблется от 1/4 до 1/2. Озера с таким содержанием калия в воде правомерно относить к водоемам с низкой устойчивостью к загрязнению ^{137}Cs из-за высокой аккумуляции радионуклида рыбой — важным продуктом питания коренных народов Севера.

По экспериментальным данным [2, 3, 16] нами рассчитаны КН ^{137}Cs рыбами Вялозера, Ловозера (Россия) и озер юга Финляндии (табл. 4). Между водоемами по датам наблюдений за уровнями ^{137}Cs нет больших различий. Таблица дополнена определениями коэффициента пропорциональности ^{137}Cs , в расчет которого введена поправка на распад радионуклида. На 1986 г. плотность отложения «чернобыльского» ^{137}Cs на озера Онтоярви, Конневеси, Пяйянне (залив), Пюхьярви, Вехьярви, Сиякярви составили 7,2, 28,0, 62,0, 54,0, 59,0, 51,0 кБк/м² соответственно [16].

КН ^{137}Cs у хищных видов рыб из Ловозера ниже, чем у окуня и налима из Вялозера, так как в воде Ловозера калия больше. КН ^{137}Cs у окуня, щуки, налима из Вялозера меньше максимальных величин КН, наблюдаемых у окуня из финских озер Вехьярви и Сиякярви (см. табл. 4), — 9060 и 16210 соответственно. Примерно через 14 лет после отложения «чернобыльского» ^{137}Cs его уровни в пробах окуня из этих озер (см. табл. 4) превышали регламент в 130 Бк/кг соответственно в 22 и 36 раз.

Для олиготрофных озер Вялозеро, Онтоярви, Конневеси и Пяйянне диапазон КН ^{137}Cs составил 6960—8820 единиц. По-видимому, накопление ^{137}Cs рыбой из этих озер протекало в условиях незначительных различий между озерами по содержанию калия в воде. Для Вялозера уровень калия в воде равен 0,7—0,8 мг/л. В Финляндии [11] имеются озера с низким уровнем калия — от 0,2 до 0,9 мг/л, из-за чего в них накопление глобального ^{137}Cs рыбами было высоким. По гидрохимическим данным [30] в Карелии большие озера Топозеро, Куйто, Выгозеро, Нюк содержат в воде ионы (Na + K) в количестве менее 1,5 мг/л. Озера с низким содержанием калия в воде при прочих равных условиях будут характеризоваться повышенным накоплением ^{137}Cs рыбой.

Наименьшим КН ^{137}Cs (3450 единиц) характеризовалось накопление окунем из озера Пюхьярви (Финляндия). Оценка уровня калия в воде этого озера с помощью выражения (5) показала, что наблюдаемое накопление ^{137}Cs окунем из этого озера возможно при содержании калия в воде, равном 1,7 мг/л.

По нашим расчетам, коэффициент переноса ^{137}Cs для разных видов рыб из Вялозера находится в диапазоне $2,0—26 \cdot 10^{-3}$ Бк кг⁻¹/Бк м⁻². Эти значения характеризуют перенос ^{137}Cs в рыбу при времени экспозиции радионуклида в водоеме примерно 12 лет. Для хищников из этого озера диапазон КП составляет $13,2—26,0 \cdot 10^{-3}$ Бк кг⁻¹/Бк м⁻². Верхняя граница этого диапазона ^{137}Cs совпадает с соответствующими значениями для окуня из олиготрофных озер Финляндии Онтоярви и Конневеси (см. табл. 4).

По [10] величины КП ^{137}Cs для окуня и щуки из озера Пяйянне в 1993 г. составили $12 \cdot 10^{-3}$ и $18 \cdot 10^{-3}$ Бк кг⁻¹/Бк м⁻² соответственно. Эти значения примерно в два раза выше данных 2001 г. (см. табл. 4), так как первая дата приходится на 7-, а вторая — на 15-летний период «старения» ^{137}Cs в водоеме. Длительное пребывание ^{137}Cs в водоеме сопровождается очищением вод и поверхностного слоя донных отложений от ^{137}Cs , в результате чего снижается загрязнение ^{137}Cs рыб и их кормовых объектов.

Максимальные значения КП ^{137}Cs наблюдались для озер Вехьярви и Сиякярви — $73 \cdot 10^{-3}$ и $137 \cdot 10^{-3}$ Бк кг⁻¹/Бк м⁻² соответственно. Для этих озер КН ^{137}Cs окунем составили $0,9—1,6 \cdot 10^4$ единиц.

Нами был рассчитан перенос глобального ^{137}Cs из воды в рыбу из озер Чудско-Псковское, Онежское и Сямозеро в 1972 г. для сверки КП ^{137}Cs с данными, приведенными в табл. 4. Содержание ^{137}Cs [18] в почвах водосбора Чудско-Псковского озера в 1972—1973 гг. составило 3,7 кБк/м², а в окуне — 9,3 Бк/кг [13]. КП ^{137}Cs для окуня определено в размере $2,5 \cdot 10^{-3}$ Бк кг⁻¹/Бк м⁻². Такая величина свойственна накоплению ^{137}Cs рыбой из эвтрофного озера Пюхьярви (см. табл. 4).

КП ^{137}Cs из вод Онежского озера и Сямозера был равен $15,0 \cdot 10^{-3}$ и $13,8 \cdot 10^{-3}$ Бк кг⁻¹/Бк м⁻² соответственно при содержании ^{137}Cs в рыбах [13] около 53 Бк/кг. Различие по КП ^{137}Cs в рыбу между этими озерами и Чудско-Псковским водоемом ожидалось. Минерализация вод и содержание калия в воде Чудско-Псковского озера примерно в пять и три раза выше, чем в Онежском озере и Сямозере.

Сопоставление уровней ^{137}Cs в рыбах (см. табл. 4) с данными плотности его отложения на зеркало озер позволяет определить граничную величину этого показателя, при котором содержание ^{137}Cs в рыбе не отвечает требованию санитарного регламента (130 Бк/кг). Таким значением для олиготрофных слабоминерализованных озер с уровнем калия в воде 0,7—0,8 мг/л является плотность отложения ^{137}Cs , равная 4,0 кБк/м². Выпадение «чернобыльского» ^{137}Cs в количестве 7,2 кБк/м² на водосбор озера Онтоярви привело к устойчивому во времени загрязнению рыб. Через 14 лет после загрязнения озера в окуне содержалось 160 Бк/кг ^{137}Cs . Если принять, что полупериод очищения рыб от ^{137}Cs составлял три года [17], то начальное (1988 г.) максимальное загрязнение окуня равнялось примерно 640 Бк/кг.

При таком накоплении ^{137}Cs хищником загрязнение мирных рыб в 1988 г. также превышало регламент в 130 Бк/кг. При наличии данных о содержании ^{137}Cs в воде и КН рыбой проводится оценка запаса «чистоты» пищевого сырья относительно допустимого регламента с использованием выражения:

$$ЗЧ = \frac{P}{^{137}\text{C}_B \text{КН}_P}, \quad (7)$$

где ЗЧ — запас чистоты (безразмерный показатель); P — допустимый уровень ^{137}Cs по регламенту СанПиН 2.3.2.1078-01, равный 130 Бк/кг мышц; $^{137}\text{C}_B$ — уровень ^{137}Cs в воде водоема, Бк/л; КН_P — коэффициент накопления ^{137}Cs рыбой.

Для рыб из Вялозера и Ловозера запас чистоты (кратность) изменялся от примерно 2,5 (налим, окунь) до 34,4 (сиг). Мирные виды рыб накапливают ^{137}Cs в два-три раза меньше, чем хищники. Поэтому на водоемах возможен бракераж рыбного сырья с отбором мирных видов рыб с содержанием ^{137}Cs менее 130 Бк/кг.

Применительно к загрязнению ^{137}Cs [31] рыбы и вод озера Имандра проверялись прогностические возможности выражений (5) и (6). В воде губы Молочная калия содержится 1,44 мг/л [33]. При этом КН ^{137}Cs для хищного и мирного вида рыбы равны 4212 и 1897 единиц соответственно. В 2004—2005 гг. осредненная величина (по 7 пунктам наблюдений) уровня ^{137}Cs в воде равнялась 4,3 Бк/м³. Загрязнение ^{137}Cs хищного вида рыбы составило по расчету 18,1, а мирного — 8,2 Бк/кг мышц. По данным наблюдений служб Кольской АЭС [32], максимальное содержание ^{137}Cs в хищной рыбе не превышало 27, а мирной — 17 Бк/кг. Налицо согласованность в оценках уровней ^{137}Cs в рыбе, обитающей в зоне влияния данной АЭС.

Наличие функциональной связи накопления ^{137}Cs рыбой с уровнем содержания калия в воде озер и устойчивость ее при вариабельности отдельных показателей свойств водоемов (минерализации вод, их химического состава, трофии) позволило нам сформировать на основе выражений (5) и (6) таксономические шкалы разграничения озер по КН ^{137}Cs рыбой.

При формировании таксономической шкалы (табл. 5) учтены общегеохимическая закономерность повышения минерализации поверхностных вод в меридиональном направлении с севера на юг и степенной вид зависимости КН ^{137}Cs от содержания калия в воде. Принималось во внимание, что низкие и ультранизкие концентрации калия в воде являются прерогативой арктических и субарктических водоемов с выходами на водосборы озер кристаллических пород (граниты, гнейсы), устойчивых к выщелачиванию ионов калия. Такие озера распространены на Кольском полуострове, в Карелии, на

Приполярном Урале, но наибольшее их количество приурочено к Среднесибирскому плоскогорью, плато Путорана и Камчатке.

Различия между мирными и хищными видами рыб по КН ^{137}Cs в табл. 5 учтены. В ней к мирному виду рыбы относится планктофаг. У планктофагов трофическая цепочка короче, чем у хищников, из-за чего вариабельность уровней загрязнения ^{137}Cs этого вида рыб меньше, чем у консументов третьего порядка. По этой причине в водных экосистемах планктофаги привлекались к сравнительной оценке накопления ^{137}Cs у других видов рыб [12]. КН ^{137}Cs (см. табл. 5) у хищников относятся к взрослым (половозрелым) особям, так как их молодь в первый год питается планктоном, а позднее переходит на хищничество. Превентивное разграничение озер Субарктики по КН ^{137}Cs рыбой можно рассматривать в качестве контрмеры на случаи поступления в них ^{137}Cs . Наличие сведений по КН ^{137}Cs рыбой позволит природопользователям минимизировать размеры потерь от ограничений на пищевое сырье по санитарно-гигиеническим показаниям.

Минерализация озерных вод и содержание в них калия являются природными свойствами озер. Сведения по этим характеристикам входят в число показателей стандартной гидрохимической информации. Поэтому реализация превентивной радиологической оценки озер субарктических регионов по КН ^{137}Cs не вызывает затруднений.

Реконструкция загрязнения «чернобыльским» ^{137}Cs объектов ихтиофауны озер Мурманской области и Карелии показала, что в 1988—1998 гг. накопление ^{137}Cs рыбой из озер с низкой концентрацией калия в воде менее 0,7—0,8 мг/л превышало санитарный регламент. При уровне калия в воде более 1 мг/л только у хищных видов рыб концентрации ^{137}Cs приближались к нормативу, а у мирных были ниже. Для глубоких озер этого региона применим прогноз загрязнения вод ^{137}Cs по сорбционно-диффузионной модели поглощения ^{137}Cs дном водоема на экспозицию примерно 2—7 лет. В равных условиях (отложение «чернобыльского» ^{137}Cs) устойчивость пищевой цепочки жителей Мурманской области к загрязнению ^{137}Cs была выше для звена «рыба — человек», чем «олень — человек», так как в 1988—1990 гг. регламент содержания ^{137}Cs в оленине [1, 8] был превышен в два-три раза.

Литература

1. Бакунов Н. А., Саватюгин Л. М., Фролов И. Е. Вопросы устойчивости природных комплексов Российской Арктики к радиоактивному загрязнению // Арктика: экология и экономика. — 2011. — № 1. — С. 82—93.
2. Nikitin A. I., Tsaturov Y. et al. Artificial radionuclides in components of freshwater and forest ecosystems in the south of Kola peninsula: Results of field investigations in the year 1998 // The 4th Int. Conf. on Environ-

- mental Radioactivity in the Arctic. 1999. Edinburg. — [S. I.], 1999. — P. 181—183.
3. Schutov V. N., Bruk G. Ya., Travnikova I. G. et al. The Current Radioactive Contamination of the Environment and Foodstuffs in the Kola Region of Russia // *Ibid.* — P. 307—309.
4. СанПиН 2.61.2523-09 Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). — М.: Минздрав России. 2009.
5. Håkanson L. Radioactive Caesium in Fish in Swedish Lakes 1986—1988 — General Pattern Related to Fallout and Lake Characteristics // *J. Environ. Radioactivity.* — 1992. — Vol. 15. — P. 2007—229.
6. Särkkä J., Jämsä A., Luukko A. Chernobyl-derived radiocaesium in fish as dependent on water quality and lake morphometry // *J. of Fish Biology.* — 1995. — Vol. 46. — P. 227—240.
7. Израэль Ю. А., Квасникова Е. В., Стукин Е. Д. Радиоактивное загрязнение цезием-137 территории России на рубеже веков // *Метеорология и гидрология.* — 2000. — № 4. С. 20—31.
8. Матишов Г. Г., Матишов Д. Г., Щипа Е., Руссанен К. Радионуклиды в экосистеме региона Баренцева и Карского морей. — Апатиты: Изд-во Кольского НЦ, 1994. — 238 с.
9. Рябов И. Н. Радиоэкология рыб водоемов в зоне влияния аварии на Чернобыльской АЭС. — М.: Товарищество науч. изд-в КМК, 2004. — 215 с.
10. Саксен Р., Яаккоола Т. К., Рантаваара А. Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в южной части оз. Пяйянне // *Радиохимия.* — 1996. — Т. 38. — № 4. — С. 365—370.
11. Kalehmainen A., Hasanen E., Miettinen J. K. ^{137}Cs levels in fish of different limnological types of lakes in Finland during 1963 // *Health Phys.* — 1966. — Vol. 12. — № 7. — P. 917—922.
12. Солюс А. А., Флейшман Д. Г., Леонтьев В. Г. Накопление ^{137}Cs рыбами пресноводных озер // *Вопросы ихтиологии.* — 1970. — Т. 10. — Вып. 6 (65). — С. 1091—1097.
13. Петров А. А. Искусственные радионуклиды в промысловых рыбах Мирового океана и пресных водоемов. — М.: Пищевая пром-сть, 1978. — P. 45—51. — (Труды ВНИРО. Т. 134).
14. Буянов Н. И. Концентрация ^{90}Sr и ^{137}Cs в районе сброса теплых вод Кольской АЭС // *Экология.* — 1981. — № 3. — С. 66—70.
15. Буянов Н. И., Лаптев М. И., Осколкова Н. М. Извлечение Sr-90 и Cs-137 гидробионтами различных трофических уровней пресноводных слабоминерализованных водоемов // *Труды Межд. симпоз., Одесса, 6—10 октября 1975.* — М.: Наука, 1979. — С. 248—252.
16. Ilus E, Saxen R. Accumulation of Chernobyl derived ^{137}Cs in bottom sediments of some Finnish lakes // *J. Environ. Radioactivity.* — 2005. — Vol. 82. — P. 199—221.
17. Рахола Т., Саксен К., Костийнен Э. и др. Техногенная радиоактивность в организме человека и окружающей среде // *Радиохимия.* — 2006. — Т. 48. — № 6. — С. 562—566.
18. Болтнева Л. И., Израэль Ю. А., Ионов В. А. и др. Глобальное загрязнение ^{90}Sr и ^{137}Cs дозы внешнего облучения на территории СССР // *Атом. энергия.* — 1977. — Т. 42. — Вып. 5. — С. 355—360.
19. Бакунов Н. А. Реконструкция концентраций глобального ^{137}Cs в воде Онежского озера // *Радиохимия.* — 2004. — Т. 46. — № 3. — С. 280—282.
20. Бакунов Н. А., Большианов Д. Ю., Макаров А. С., Федоров Г. Б. Вопросы прогноза уровней содержания ^{137}Cs в воде озер Восточной Финноскандии // *Экология.* — 2010. — № 3. — С. 187—190.
21. Прохоров В. М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах: Физико-химические механизмы и моделирование. — М.: Энергоиздат, 1981. — 96 с.
22. Баранов И. В. Лимнологические типы озер СССР. — Л.: Гидрометеиздат, 1961. — 276 с.
23. Пакуло А. Г. Содержание ^{137}Cs в пресноводной рыбе при различном солевом составе воды // *Вопр. морской радиобиологии.* — Калининград, 1971. — С. 38—41. — (Труды АтлантНИРО. Вып. 45).
24. Гаврилов В. М., Гритченко Э. Г., Иванова Л. И. и др. Стронций-90 и цезий-137 в водоемах прибалтийского региона Советского Союза (1986—1988 гг.) // *Радиохимия.* — 1990. — № 3. — С. 171—179.
25. Бакунов Н. А., Большианов Д. Ю., Макаров А. С. Сток глобального ^{90}Sr с водосборов Восточной Финноскандии // *Метеорология и гидрология.* — 2010. — № 10. — С. 34—44.
26. Smith J. T., Clarke R. T., Saxén R. Comparing the mobility of weaponstest and Chernobyl radiocaesium in Finland // *The 4th Int. Conf. on Environmental Radioactivity in the Arctic.* 1999. Edinburg. — [S. I.], 1999. — P. 50—52.
27. Марей А. Н. Санитарная охрана водоемов от загрязнений радиоактивными веществами. — М.: Атомиздат, 1976. — 222 с.
28. Куликов Н. В., Чеботина М. Я. Радиоэкология пресноводных биосистем. — Свердловск: УРО АН СССР. — 1988. — 129 с.
29. Ресурсы поверхностных вод СССР. — Т. 2: Карелия и Северо-Запад. — Ч. 3. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 958 с.
30. Богданов В. Т. Гидрохимическая характеристика Путоранских озер // *Путоранская озерная провинция.* — Новосибирск: Наука, 1975. — С. 57—63.
31. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2004 г.: Ежегодник / Под ред. С. М. Вакуловского. — СПб.: Гидрометеиздат, 2005.
32. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2005 г.: Ежегодник / Под ред. С. М. Вакуловского. — СПб.: Гидрометеиздат, 2006.
33. Моисеенко Т. И., Кудрявцева Л. П., Гашкина Н. А. Рассеянные элементы суши. — М.: Наука, 2006. — 261 с.