УДК 574.632:546:79(261.24)

СОДЕРЖАНИЕ ^{137}Cs В МАССОВЫХ РЫБАХ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ, ВИСЛИНСКОГО И КУРШСКОГО ЗАЛИВОВ В 1996–2002 И 2015–2016 ГОДЫ

Т.А. Васюкевич, Л.С. Нитиевская

ФГБНУ «АтлантНИРО», г. Калининград
radiology@atlantniro.ru

Васюкевич Т.А., Нитиевская Л.С. Содержание ^{137}Cs в массовых рыбах Балтийского моря, Вислинского и Куршского заливов в 1996–2002 и 2015–2016 годы // Труды АтлантНИРО. 2018. Том 2, № 1(5). Калининград: АтлантНИРО. С. 22–28.

Обобщены данные о содержании ^{137}Cs в балтийской сельди, шпроте, треске, камбале (ИЭЗ РФ Балтийского моря, 26 подрайон ИКЕС) и плотве, леще, судаке и чехони (Вислинский и Куршский заливы), собранные в 1996–2002 и 2015–2016 гг. В 1996–2002 гг. выполнено определение ^{137}Cs у 231 экз. рыб и в 2015–2016 гг. – у 184 экз. За 20 лет произошло снижение активности ^{137}Cs у всех исследованных видов рыб. Максимум содержания ^{137}Cs отмечен в судаке Вислинского залива в начале 2000-х годов – 28,9 Бк/кг, в настоящее время оно не превышает 16,6 Бк/кг. Уровень загрязнения ^{137}Cs балтийской трески снизился с 19,0 до 8,1 Бк/кг; камбалы Балтики – с 14,0 до 5,4 Бк/кг; балтийской сельди – с 12,8 до 5,8 Бк/кг и шпрота – с 11,1 до 4,2 Бк/кг. Концентрации ^{137}Cs в четырех видах рыб Куршского залива, леще и плотве Вислинского залива были в диапазоне 0,1–4,2 Бк/кг. Эффективные периоды полуснижения активности ^{137}Cs составили в балтийских рыбах 11–16, рыбах Вислинского залива – 14–42 и Куршского залива – 17–26 лет. Выявлена зависимость скорости снижения активности ^{137}Cs в рыбах от типа питания, образа жизни, гидродинамики и гидрохимии среды обитания. Снижение активности ^{137}Cs в рыбе юго-восточной части Балтики происходит быстрее физического распада ^{137}Cs, что обусловлено выносом загрязнителя за пределы акватории системой течений. В заливах поступление ^{137}Cs в экосистемы преобладает над его физическим распадом. Содержание ^{137}Cs во всех биоресурсах Балтийского моря и заливов значительно ниже допустимого уровня и имеет устойчивую тенденцию снижения при условии отсутствия дополнительных поступлений радионуклида в бассейн с регламентированными или аварийными сбросами и инцидентами.

Ключевые слова: балтийская сельдь, шпрот, треска, камбала, плотва, лещ, судак, чехонь, Балтийское море, Куршский залив, Вислинский залив, ^{137}Cs, эффективный период полуснижения

Vasyukevich T.A., Nitiyevskaya L.S. ^{137}Cs content in mass abundant fishes of the Baltic Sea, Vistula and Curonian Lagoons // Trudy AtlantNIRO. 2018. Vol. 2, № 1(5). Kaliningrad: AtlantNIRO. P. 22–28.

Results of investigations on ^{137}Cs content in mass abundant fishes carried out in 1996–2002 and 2015–2016 in the exclusive economic zone of the Russian Federation in the South-East Baltic (26 ICES Subarea, territorial sea), Vistula and Curonian Lagoons are summarized and analyzed. Decrease in activity in the main fishing grounds of the Baltic Sea, Vistula and Curonian Lagoons for 20 years of observations is shown. Half-life of ^{137}Cs activity is calculated for the Baltic fishes – 11–16 years, fishes of the Vistula Lagoon – 14–42 years,

Curonian Lagoon – 17–26 years. The rate of ^{137}Cs activity reduction in fish depends on the type of food, mode of life, hydrodynamics and hydrochemistry of the environment. The decrease in ^{137}Cs activity in the South-East Baltic fish is faster than the physical decay of ^{137}Cs, due to the removal of the pollutant from the water area by the current system. In the lagoons, ^{137}Cs entering to ecosystem prevails over its physical decay. The ^{137}Cs content in all studied fishes of the Baltic Sea and the lagoons is significantly below the permissible level and it has a steady downward trend, provided that there is no additional radionuclide input to the basin with regulated or accidental discharges and incidents.

Keywords: Baltic herring, sprat, cod, flounder, roach, bream, pikeperch, sabrefish, Baltic Sea, Curonian Lagoon, Vistula Lagoon, ^{137}Cs, effective half-life

Введение

Необходимость контроля радионуклидов в водных биологических ресурсах (ВБР) Балтийского моря обусловлена особенностями данного бассейна. По сравнению с водными организмами других акваторий ВБР Балтики подвержены повышенному риску потенциального радиоактивного загрязнения. Здесь присутствует комплекс факторов риска: а) малые глубины заливов и собственно Балтики, что приводит в итоге к высоким концентрациям радионуклидов в воде при их выпадениях на водную поверхность; б) значительная площадь водосборного бассейна, которая в течение длительного времени кратно увеличивает загрязнение среды обитания ВРБ терригенными стоками; в) замкнутость моря приводит к задержке загрязнителей на длительные сроки; г) низкая соленость воды обуславливает высокие коэффициенты накопления радионуклидов водными организмами.

В настоящее время Балтийское море является одним из наиболее радиоактивно загрязненных среди всех морей мира [Worldwide …, 2005]. Основной загрязнитель его акватории – ^{137}Cs, имеющий чернобыльское происхождение. Загрязнение Балтики в результате аварии на Чернобыльской атомной электростанции было неравномерным. Максимальному загрязнению подверглись Ботнический и центральная часть Финского залива: плотность выпадений ^{137}Cs здесь достигла 40–185 кБк/м^2. Юго-восточная часть Балтики, Куршский и Вислинский (Калининградский) заливы первоначально не попали в зону массированного загрязнения, плотность выпадений ^{137}Cs здесь варьировала от 2 до 10 кБк/м^2 [Атлас…, 1998]. За счет притока пресных вод рек, течений и штормов происходило перераспределение ^{137}Cs, и к началу 1990-х годов объёмная активность ^{137}Cs в воде практически выровнялась по всей акватории Балтийского моря, снизившись в Ботническом и Финском заливах и достигнув максимума в юго-восточной части. В настоящее время содержание ^{137}Cs в водах собственно Балтики значительно выше, чем в водах ее заливов. В данной работе период наблюдений 1996–2002 гг. был выбран как контрольный для наблюдения за динамикой ^{137}Cs в ВБР [Васюкевич и др., 2015].

Цель сообщения – описание результатов мониторинга радиоактивного загрязнения ВБР, проводимого специалистами АтлантНИРО в 1996–2002 гг. и 2015–2016 гг., и оценка скорости снижения активности ^{137}Cs в основных промысловых объектах Балтийского моря, Куршского и Вислинского заливов.

Материал и методика

Пробы рыб для исследований были отобраны в 1996–2002 гг. и 2015–2016 гг. из промысловых уловов в экономических зонах РФ в юго-восточной части Балтийского моря (26 подрайон ИКЕС) и Вислинского (Калининградского) и Куршского заливов. Объектами государственного мониторинга в Балтийском море являются основные промысловые виды

рыб – балтийская сельдь (салака), балтийский шпрот, треска и камбала, а в Куршском и Вислинском заливах – плотва, лещ, судак и чехонь. Исследования на содержание ^{137}Cs проводили согласно ГОСТ 32161 [Продукты пищевые. Метод определения …, 2013]. Подготовка проб к измерениям, в соответствии с ГОСТ 32164 [Продукты пищевые. Метод отбора …, 2013], включала первичную обработку рыбы и, при необходимости, её измельчение с целью лучшего усреднения пробы и увеличения массы измеряемой пробы. Мелкую рыбу (массой не более 0,1 кг) использовали для анализа без разделки. Измерение активности проводили в соответствии с аттестованной методикой выполнения измерений. Всего в 1996–2002 гг. выполнено 231 исследование по определению ^{137}Cs в пробах рыб и в 2015–2016 гг. – 184 (табл. 1). В каждой пробе в зависимости от размера рыб использовалось 6 рыб при массе одной особи от 0,1 до 0,5 кг; 3 рыбы при индивидуальной массе от 0,5 до 1 кг и 1 рыба при массе особи от 1 до 3 кг. Исключение составили шпрот балтийский и салака. Для формирования проб из них использовали, соответственно, около 50–80 и 20–40 экз., в зависимости от размерного состава рыб в данной пробе.

Таблица 1

Данные об объеме исследованного материала на содержание ^{137}Cs в рыбах Балтики и заливов
Data on scope of the material studied for ^{137}Cs content in the fishes of the Baltic and the lagoons

Район промысла	Объект исследования	Количество проб	
		1996–2002 гг.	2015–2016 гг.
Балтийское море	Камбала балтийская речная *Platichtys flesus trachurus*	30	21
	Сельдь балтийская (салака) *Clupea harengus membras*	31	21
	Треска балтийская *Gadus morhua calbarias*	31	19
	Шпрот балтийский *Sprattus sprattus balticus*	39	20
Вислинский залив	Лещ *Abramis brama*	13	11
	Плотва *Rutilus rutilus*	7	10
	Судак *Stizostedion lucioperca*	20	9
	Чехонь *Pelecus cultratus*	4	3
Куршский залив	Лещ *Abramis brama*	21	22
	Плотва *Rutilus rutilus*	9	15
	Судак *Stizostedion lucioperca*	18	20
	Чехонь *Pelecus cultratus*	8	13

Определение содержания ^{137}Cs в рыбах проводили в геометрии Маринелли объемом 1 дм^3 на спектрометрических комплексах «Гамма Плюс» (1996–2001 гг.), «Прогресс» (2002 г.) и «Прогресс-БГ» (2015–2016 гг.). Все спектрометры были оснащены сцинтилляционными блоками детектирования NaI(Tl) 63×63 и программным обеспечением «Прогресс» актуальной версии. Удельная активность выражена в Беккерелях на килограмм сырого веса (Бк/кг). Относительная погрешность измерений при определении ^{137}Cs – 15–60%.

Результаты

В период наших наблюдений, охватывающих 20 лет, произошло снижение верхних, нижних границ диапазонов активностей ^{137}Cs и его средних значений (табл. 2). Кратность снижения близкая к двум, обнаруженная практически во всех контролируемых объектах промысла (рис.), позволяет предположить, что она обусловлена не только

физическим распадом радионуклида, который для ^{137}Cs равен 30 годам, но и гидродинамическими и гидрохимическими процессами выведения ^{137}Cs из экосистем.

Таблица 2

Удельная активность ^{137}Cs в массовых рыбах Балтийского моря и заливов: минимальная, максимальная, средняя, погрешность среднего – Δ, Бк/кг
^{137}Cs specific activity in mass abundant fishes of the Baltic Sea and the lagoons: minimum, maximum, average, mean accuracy – Δ, Bq/kg

Район наблюдений	Объект	Период, годы							
		1996–2002				2015–2016			
		мин.	макс.	ср.	Δ	мин.	макс.	ср.	Δ
Балтийское море	Камбала	4,7	14,0	8,8	0,9	2,0	5,4	4,20	0,43
	Сельдь	2,4	11,1	6,8	0,7	1,4	5,8	3,38	0,52
	Треска	5,1	19,0	11,2	1,4	3,9	8,1	5,31	0,60
	Шпрот	2,7	12,8	7,8	0,7	1,8	4,2	2,81	0,35
Вислинский залив	Лещ	менее 1,0	9,9	3,3	1,6	0,7	2,5	1,49	0,36
	Плотва	менее 1,0	6,1	2,8	2,0	0,8	4,2	2,08	0,74
	Судак	1,8	28,9	13,9	3,6	3,2	16,6	9,5	3,3
	Чехонь	6,1	8,3	7,5	1,6	5,2	6,4	5,7	1,5
Куршский залив	Лещ	менее 1,0	5,7	2,1	0,7	0,2	3,5	1,35	0,45
	Плотва	менее 1,0	4,6	2,0	0,9	0,1	3,3	1,05	0,55
	Судак	менее 1,0	6,2	3,8	0,8	0,4	3,7	1,92	0,45
	Чехонь	менее 1,0	3,5	2,0	0,7	0,1	3,2	1,52	0,65

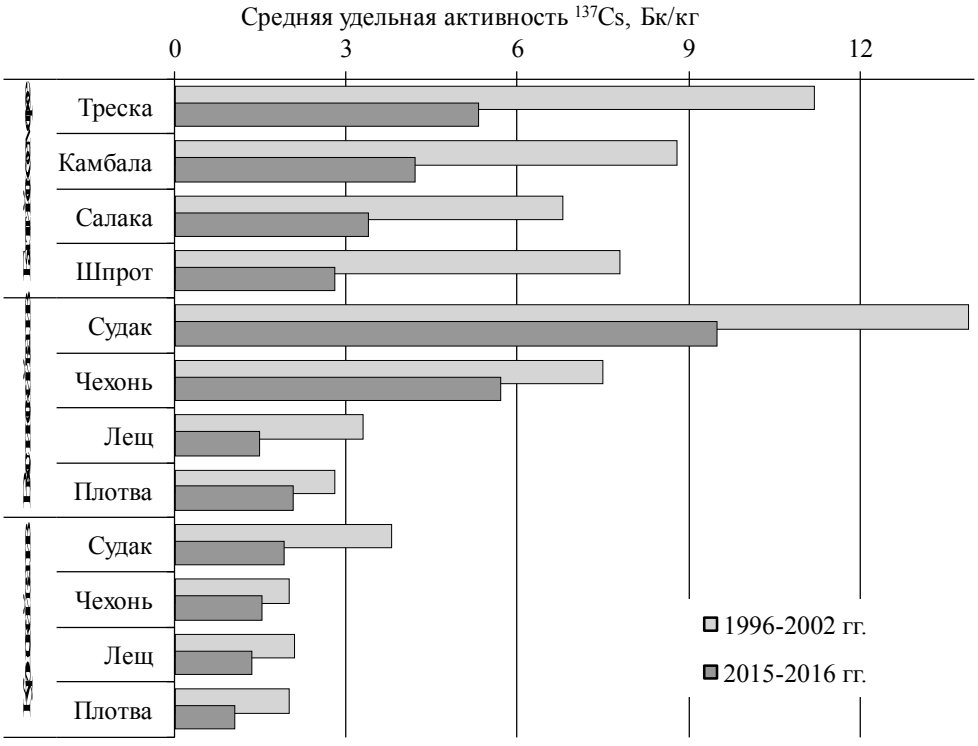

Рисунок. Средняя удельная активность ^{137}Cs в массовых рыбах Балтики, Куршского

и Вислинского заливов в периоды наблюдений 1996–2002 и 2015–2016 гг.

Figure. Average specific activity of ^{137}Cs in the mass abundant fishes of the Baltic, Curonian and Vistula Lagoons in the periods of observations 1996–2002 and 2015–2016

Хищники и бентофаги, как правило, накапливают радионуклид в больших количествах, чем планктофаги [Алексахин и др., 2001; Пути миграции …, 1999; Полякова, 2008]. Максимум содержания ^{137}Cs, отмеченный в судаке Вислинского залива в начале 2000-х годов, составил 28,9 Бк/кг. В настоящее время верхняя граница активности ^{137}Cs установилась на уровне 16,6 Бк/кг. Уровень загрязнения крупных экземпляров балтийской трески (массой более 1 кг) в конце 1990-х годов достигал 19,0 Бк/кг, в настоящее время не превышает 8,1 Бк/кг. В камбале Балтики в 1996–2002 гг. регистрировались уровни ^{137}Cs до 14,0 Бк/кг, в последние годы – не более 5,4 Бк/кг; максимумы загрязнения балтийских сельди и шпрота составляли 12,8 и 11,1 Бк/кг, в настоящее время 5,8 и 4,2 Бк/кг соответственно.

Концентрация ^{137}Cs в исследованных непроходных видах рыб Куршского, а также леще и плотве Калининградского заливов регистрировалась в интервале от 0,1 до 4,2 Бк/кг.

Скорость процесса освобождения системы от радионуклида характеризуется эффективным периодом полувыведения $T_{эфф}$. Это время, в течение которого активность радионуклида уменьшается в два раза в результате всех связанных с этим процессов.

Периоды полуснижения активности рассчитаны исходя из зависимости:

$$A = A_0 e^{-\frac{0,693t}{T_{эфф}}}, \quad (1)$$

где A_0 – исходная активность ^{137}Cs,

A – активность через время t,

$T_{эфф}$ – эффективный период полуснижения активности.

Выведение ^{137}Cs из экосистемы происходит за счет физического распада и динамических, химических процессов обмена веществ. При выведении радионуклидов из организма, помимо физического распада, происходит физиологическое (биологическое) очищение. Вклад каждого из процессов в общем случае можно оценить исходя из выражения:

$$\frac{1}{T_{эфф}} = \frac{1}{T_{физ}} + \frac{1}{T_{экол}}, \quad (2)$$

где $T_{физ}$ – период полураспада,

$T_{экол}$ – период полувыведения за счет обменных процессов.

Полученные данные позволили оценить скорости снижения активности ^{137}Cs в основных промысловых видах рыб Балтики и заливов (табл. 3).

Таблица 3

Параметры снижения активности ^{137}Cs в рыбе Балтики и заливов
Parameters of ^{137}Cs activity reduction in the fishes of the Baltic and the lagoons

Район наблюдений	Объект	Кратность снижения		$T_{эфф}$, лет		$T_{экол}$ среднего, лет
		верхней границы диапазона	среднего	верхней границы диапазона	среднего	
Балтийское море	Камбала	2,59	2,10	12,0	15,4	32
	Сельдь	1,91	2,01	17,6	16,4	36
	Треска	2,34	2,11	13,4	15,3	31
	Шпрот	3,05	2,78	10,3	11,2	18
Вислинский залив	Лещ	3,96	2,21	8,3	14,4	28
	Плотва	1,45	1,35	30,6	38,5	~136
	Судак	1,74	1,46	20,6	30,0	–
	Чехонь	1,30	1,32	44,0	41,7	~107
Куршский	Лещ	1,63	1,56	23,4	25,9	190

залив	Плотва	1,39	1,90	34,4	17,7	43
	Судак	1,68	1,98	22,2	16,7	38

Скорость снижения активности балтийского шпрота – пелагической рыбы, питающейся зоопланктоном, практически совпадает со скоростью снижения активности морской воды [Васюкевич и др., 2017]. Снижение активности других балтийских рыб происходит медленнее, что, в частности, обусловлено прочной фиксацией и длительной задержкой ^{137}Cs в донных отложениях и, следовательно, в бентосе, являющемся кормом для камбал и трески. Салака – пелагическая рыба, в спектр питания которой входит зоопланктон при доминировании мелких ракообразных (копеподы и кладоцеры), личинки и мальки рыб и даже донные полихеты и ракообразные. Накопление и передача радионуклида по трофической цепи может тормозить снижение активности сельди относительно «чистого» планктофага шпрота. Кроме того, на процесс обмена ^{137}Cs может оказывать влияние и тот факт, что поступившая на исследования салака может быть частично выловлена в Вислинском заливе при её заходе на нерест.

Значительное загрязнение ^{137}Cs практически всей площади илистых донных осадков Вислинского залива замедляет снижение активности ^{137}Cs у судака, плотвы и чехони этого залива. Для Куршского залива характерно наличие больших площадей песчаных донных осадков, плотность загрязнения которых существенно ниже, чем алевритовых и пелитовых илов. В связи с этим скорость снижения активности тканей рыб Куршского залива превышает скорость, обусловленную физическим распадом радионуклида.

В замкнутой системе снижение активности ^{137}Cs происходит только за счет физического распада, в этом случае $T_{эфф}=T_{физ}$. В открытых системах возможны варианты: при преобладании процессов выведения загрязнителя над поступлением $T_{эфф}< T_{физ,}$ $T_{экол}>0$, при доминировании входящих потоков поллютанта над исходящими $T_{эфф} >T_{физ}$, $T_{экол}<0$. Сопоставление полученных величин $T_{эфф}$ с периодом полураспада ^{137}Cs позволяет заключить, что в настоящее время в открытой системе юго-восточной части Балтики снижение удельной активности ^{137}Cs в основных промысловых рыбах происходит быстрее физического распада ^{137}Cs. Это, по-видимому, следствие выноса загрязнителя за пределы акватории системой течений. В заливах поступление ^{137}Cs в экосистемы преобладает над его физическим распадом.

В материалах Хельсинкской комиссии по защите морской среды Балтийского моря (HELCOM) представлены временные тренды удельной активности ^{137}Cs у трех видов рыб: сельди, трески и камбаловых в 1984–2015 гг. Эффективные периоды полуснижения активности ^{137}Cs в рыбе составили: сельдь 12,2±0,6, треска 13,9±1,2, камбала 12,2±0,6 лет [HELCOM, 2017]. По нашим данным, снижение активности тканей балтийских рыб в 26-м подрайоне Балтики в 1996–2016 гг. происходит при $T_{эфф}$ у камбалы 15,4±1,5, сельди 16,4±2,1, у трески 15,3±1,7, шпрота 11,2±0,9 лет.

Нормы на содержание радионуклидов в пищевых продуктах регламентированы СанПиН 2.3.2.1078-01 [Гигиенические…, 2002] и ТС ТР 021/2011 [Технический регламент…, 2011]. Допустимый уровень активности (ДУА) радионуклидов в рыбе живой, свежей, охлажденной, мороженой и продукции из нее не должен превышать 130 Бк/кг ^{137}Cs и 100 Бк/кг ^{90}Sr, за исключением рыбы сушеной и вяленой, в которой нормируется только содержание ^{137}Cs – не более 260 Бк/кг. Особые нормы установлены для детского питания. Согласно СанПиН 2.3.2.1078-01 в продуктах прикорма на рыбной основе допустимо содержание 100 Бк/кг ^{137}Cs и 60 Бк/кг ^{90}Sr. В ТР ТС 021/2011 во всех специализированных продуктах детского питания в готовом для употребления виде содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr не должно превышать 40 и 25 Бк/кг соответственно.

Содержание ^{137}Cs во всех исследованных видах рыб Балтийского моря и заливов значительно ниже допустимого уровня и имеет устойчивую тенденцию к снижению при условии отсутствия дополнительного поступления радионуклида в бассейн с регламентированными или аварийными сбросами.

Заключение

Опасность радиоактивного загрязнения водоемов состоит в том, что даже незначительное по сравнению с естественной радиоактивностью поступление техногенных радионуклидов обуславливает заметное накопление их водными организмами и может привести к загрязнению ВБР выше уровней, допустимых при употреблении в пищу.

За период с конца 1990-х годов до настоящего времени произошло снижение верхних, нижних границ диапазонов активностей ^{137}Cs и его средних значений. Кратность снижения средних значений активности в основных промысловых объектах Балтийского моря, Вислинского и Куршского заливов составила 1,3–2,8. Эффективные периоды полуснижения активности ^{137}Cs в балтийских рыбах – 11–16, рыбах Вислинского залива – 14–42 и Куршского залива – 17–26 лет. Различия в скорости выведения радионуклида из ВБР обусловлены особенностями загрязнения среды обитания и образа жизни рыб.

Список литературы

Алексахин Р.М. [и др.]. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Алексахин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А., Дрожко Е.Г., Ильин Л.А., Крышев И.И., Линге И.И., Романов Г.Н., Савкин М.И., Сауров М.М., Тихомиров Ф.А., Холина Ю.Б. / Под ред. Л.А. Ильина и В.А. Губанова. М.: ИздАТ, 2001. 752 с.

Атлас загрязнения Европы цезием после Чернобыльской аварии / Науч. рук. Израэль Ю.А. Люксембург: Люксембург. бюро для офиц. изд. европ. сообществ; Комис. европ. сообществ, 1998. 71 с.

Васюкевич Т.А., Нитиевская Л.С., Тихомирова М.Ю. Анализ данных многолетнего мониторинга водных биологических ресурсов Балтийского моря, Куршского и Вислинского (Калининградского) заливов по радиологическим показателям // Матер. X Междунар. науч.-практ. конф. «Производство рыбной продукции: проблемы, новые технологии, качество» (г. Светлогорск Калининградской области, 8–11 сент. 2015 г.). Калининград: АтлантНИРО, 2015. С. 214–217.

Васюкевич Т.А., Нитиевская Л.С. Радиационная обстановка в морских водах и внутренних водоемах Калининградской области в 2016 г. // Труды АтлантНИРО. 2017. Новая серия. Т. 1, № 2. Калининград: АтлантНИРО. С. 5–30.

Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.3.2.1078-01. М.: ФГУП «ИнтерСЭН». 2002. 168 с.

Полякова Н.И. Особенности накопления ^{137}Cs у рыб разных трофических уровней из водоемов, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС: дисс. … канд. биол. наук. М., 2008. 195 с.

Продукты пищевые. Метод определения содержания цезия Cs-137. ГОСТ 32161-2013. 16 с.

Продукты пищевые. Метод отбора проб для определения стронция Sr-90 и цезия Cs-137. ГОСТ 32164-2013. 7 с.

Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиоэкология после Чернобыля: Пер. с англ. / Под ред. Ф. Уоррена и Р. Харрисона. М.: Мир, 1999. 512 с.

Технический регламент Таможенного союза. О безопасности пищевой продукции. ТР ТС 021/2011 – Евразийская экономическая комиссия, 2011. 242 с. // ЕАЭК, 2011. URL: http://www.tsouz.ru/db/techreglam/Documents/TR%20TS%20PishevayaProd.pdf (Date of access: 02. 04. 2018).

HELCOM MORS thematic assessment 2011-2015 of radioactive substances in the Baltic sea // HELCOM, 2017. URL: https://portal.helcom.fi/meetings/HOD%2052-2017-405/Meeting

Documents/3-8%20Thematic%20Assessment%20of%20Radioactive%20Substances%20in%20the% 20Baltic%20Sea%202011-2015.pdf (Date of access: 20.03.2018)

Worldwide marine radioactivity studies (WOMARS). Radionuclide levels in oceans and seas. Final report of a coordinated research project. IAEA-TECDOC-1429. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005, 187 pp. [Electronic recource] // IAEA. 2005. URL: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE_1429_web.pdf. (Date of access: 20.03.2018).