

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ НАКОПЛЕНИЯ И БИОЛОГИЧЕСКОГО ПЕРЕНОСА ^{137}Cs В РЫБЕ БАРЕНЦЕВА МОРЯ ПРИ ГИПОТЕТИЧЕСКОЙ АВАРИИ С ЗАТОНУВШЕЙ АТОМНОЙ ПОДВОДНОЙ ЛОДКОЙ К-159

А. И. Крышев, Т. Г. Сазыкина

Научно-производственное объединение «Тайфун», г. Обнинск, Россия

Выполнена оценка максимальных уровней и динамики загрязнения ^{137}Cs промыслового придонного вида рыб, пикши (*Melanogrammus aeglefinus*), для сценария гипотетической аварии с затонувшей атомной подводной лодкой К-159 в Баренцевом море. Для решения этой задачи рассчитаны уровни загрязнения донных отложений вблизи места аварии и разработана динамическая модель накопления ^{137}Cs в пикше Баренцева моря с учетом ее сезонных миграций. Загрязнение донных отложений ^{137}Cs может сохраняться на протяжении длительного времени после аварии, что приводит к поступлению радионуклида в промысловый вид рыб по бентосной пищевой цепочке: донные отложения – бентосная фауна – рыба-бентофаг. При рассмотренном аварийном сценарии уровни содержания ^{137}Cs в пикше, превышающие санитарно-гигиенический норматив 130 Бк/кг, возможны, если рыба провела от одних суток до трех месяцев вблизи загрязненного участка – до 200 м от места аварии. При этом из-за сезонных миграций пикши вылов рыбы может быть произведен в разных частях акватории Баренцева моря, в т. ч. на значительном удалении от загрязненного участка. Расчетное содержание ^{137}Cs в пикше при ее краткосрочном нахождении на расстоянии 2 км от места аварии не превысит 10 Бк/кг. В течение первого года после аварии максимальная доза от потребления одной выловленной особи пикши массой 2 кг, проведшей одну неделю вблизи пятна загрязнения, оценена равной 0,03 мЗв, 2 недели – 0,06 мЗв, 1 месяц – 0,12 мЗв, 2 месяца – 0,24 мЗв, 3 месяца – 0,35 мЗв, что ниже годовой дозовой квоты для населения. Выполненные оценки показывают необходимость моделирования биологического переноса ^{137}Cs мигрирующими промысловыми видами рыб арктических морей в случае обнаружения или прогноза высоких уровней загрязнения донных отложений.

Ключевые слова: Арктика; Баренцево море; радиационная авария; К-159; ^{137}Cs ; модель; донные отложения; рыба; пикша; доза.

1. Введение

На дне морей Арктики находится около 18 000 радиационных объектов, в т. ч. контейнеры с твердыми радиоактивными отходами, радиоактивные конструкции и блоки, суда с твердыми радиоактивными отходами на борту [1, 2]. Некоторые из затопленных/затонувших объектов содержат радиоактивные вещества в составе отработавшего ядерного топлива. К числу таких объектов относится советская атомная подводная лодка К-159 проекта 627А, которая затонула 30 августа 2003 г. в южной части Баренцева моря в результате нештатной ситуации при транспортировке на утилизацию [2]. Место затопления лодки К-159 находится на расстоянии 6 км от острова Кильдин, перед входом в Кольский залив Баренцева моря. Для этого ядерно- и радиационно опасного объекта существует гипотетическая возможность радиационной аварии с самопроизвольной цепной реакцией, что может привести к поступлению долгоживущих техногенных радионуклидов в морскую среду [2].

Был разработан сценарий аварии при подъеме лодки К-159 для транспортировки на утилизацию, в рамках которого определено, что в морскую воду может поступить до $2,48 \cdot 10^{13}$ Бк ^{137}Cs [2]. Модель расчета распространения ^{137}Cs показала, что объемная активность радионуклида в воде Баренцева моря быстро

снижается за счет разбавления и переноса с течениями, с достижением фоновых значений через 12 месяцев после аварии [3, 4].

При этом прогнозируется сохранение высоких уровней удельной активности ^{137}Cs в донных отложениях на протяжении длительного времени после аварийного поступления. Особое значение это имеет в непосредственной близости от источника аварийного загрязнения, где формируется пятно с высокими уровнями удельной активности ^{137}Cs в донных отложениях. Наличие такого пятна должно быть учтено при анализе радиоэкологических последствий гипотетической аварии, поскольку ^{137}Cs в донных отложениях – источник загрязнения всей бентосной пищевой цепочки, включая придонные виды рыб [5].

Для Баренцева моря характерно наличие промысловых видов рыб, совершающих сезонные миграции. Одним из таких видов является пикша (*Melanogrammus aeglefinus*). В летний период (июль – сентябрь) пикша присутствует в южной части Баренцева моря, где основу ее рациона составляет бентосная фауна [6]. Задача исследования – оценить уровни и динамику загрязнения ^{137}Cs пикши для рассмотренного сценария аварии в зависимости от длительности ее нахождения на небольшом (до 200 м) участке с высоким уровнем содержания ^{137}Cs в донных отложениях (от одних суток до трех месяцев). Для решения этой задачи рассчитаны уровни загрязнения донных отложений и бентосной фауны вблизи места аварии и разработана динамическая модель накопления ^{137}Cs в пикше Баренцева моря в предположении поступления радионуклида в рыбу по бентосной пищевой цепочке.

2. Материалы и методы

Загрязнение морской воды вблизи места аварии оценено с помощью двумерной модели рассеивания ^{137}Cs в морской воде от мгновенного источника. Динамика усредненной по глубине объемной активности ^{137}Cs в морской воде ($\text{Бк}/\text{м}^3$) рассчитывалась по формуле:

$$C_w(x, y, t) = \frac{A_0}{H} \cdot G(x, y, t) \cdot \exp\left(-\frac{w}{H} \cdot t\right), \quad (1)$$

где A_0 – активность ^{137}Cs , поступившая в морскую воду при аварии, Бк;

H – глубина в месте аварии, м;

w – гидравлическая крупность частиц, м/с;

t – время с момента аварийного (разового) поступления ^{137}Cs в воду, с;

величина $G(x, y, t)$ – динамическая функция рассеяния в морской среде единичного разового источника – рассчитывается по формуле [7]:

$$G(x, y, t) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y} \cdot \exp\left(-\frac{(x - u_x \cdot t)^2}{2 \cdot \sigma_x^2} - \frac{(y - u_y \cdot t)^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right), \quad (2)$$

где x, y – расстояния по координатным осям с центром в месте расположения источника загрязнения, м;

u_x, u_y – скорости течения по оси x и y соответственно, м/с;

σ_x, σ_y – дисперсии распределения примеси, вычисляются по формулам [7]:

$$\sigma_x^2 = \alpha \cdot t^3 + \sigma_{0,x}^2; \sigma_y^2 = \alpha \cdot t^3 + \sigma_{0,y}^2, \quad (3)$$

где $\alpha = 8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}^3$,

σ_0 – начальный размер пятна радиоактивного загрязнения, м.

Для гипотетической аварии с затопленной подводной лодкой К-159 величина σ_0 принята равной длине лодки 107,4 м [2]; скорость течения в южной части Баренцева моря – $u_x=0,4$ м/с; скорость поперечного течения – $u_y=0$ (рассматривается загрязнение по оси распространения аварийного следа).

Максимальная удельная активность ^{137}Cs в верхнем слое донных отложений (Бк/кг) рассчитывается по формуле:

$$C_{s,\max} = \int_0^{t_s} \frac{w}{\rho_s \cdot h} \cdot C_w(t) dt, \quad (4)$$

где t_s – время прохождения загрязненной морской воды над участком донных отложений;

$h=0,1$ м – толщина поверхностного (эффективного) слоя донных отложений;

$\rho_s=1\,250$ кг/м³ – плотность донных отложений.

Расчетное время прохождения пятна загрязнения морской воды на расстоянии 200 м от источника аварийного сброса составляет не более 30 мин.

Для частиц взвеси размером более 1 мм гидравлическая крупность рассчитывается по формуле [8]:

$$w = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot d_p \cdot \rho_p}{3 \cdot r \cdot \rho_w}}, \quad (5)$$

где $g=9,8$ м/с²;

d_p – диаметр частицы взвеси, м;

r – коэффициент сопротивления, для шарообразной частицы равен 0,45 [8];

$\rho_p=2\,600$ кг/м³ – плотность частиц взвеси;

$\rho_w=1\,020$ кг/м³ – плотность морской воды.

Осаждение крупных частиц, образовавшихся при аварии на радиационно опасном объекте в море и содержащих ^{137}Cs , происходит в ближней зоне аварии в радиусе, приблизительно равном $2 \cdot \sigma_0$. Вследствие осаждения радиоактивных частиц на дне формируется пятно загрязнения ^{137}Cs . Для рассматриваемого сценария величина w вычислена по формуле (5) при $d_p=10^{-3}$ м для расстояний до 200 м от места затопления лодки К-159 и равна 0,27 м/с, а для больших расстояний принята равной 10^{-4} м/с.

Загрязнение ^{137}Cs донных отложений вблизи места аварии (Бк/кг) сохраняется длительное время и снижается за счет миграции радионуклида в более глубокие слои:

$$C_s = C_{s,\max} \cdot \exp(-r_s \cdot t), \quad (6)$$

где $r_s=10^{-3}$ год⁻¹;

t – время с момента начального загрязнения донных отложений.

Сделано предположение, что вблизи сформировавшегося пятна загрязнения источником поступления ^{137}Cs в бентосную пищевую цепочку будут преимущественно донные отложения, а не морская вода.

Накопление и выведение радионуклида водными организмами зависит от их физиологических характеристик (масса, интенсивность роста и метаболизма), а также факторов окружающей среды и положения вида в трофической структуре экосистемы [9, 10]. Удельная активность радионуклида C_f (Бк/кг) в пикше (рыбе-бентофаге) рассчитывается с помощью уравнения:

$$\frac{dC_f}{dt} = -(\lambda + \varepsilon + \mu) \cdot C_f + (\varepsilon + \mu) \cdot CF_{f,s} \cdot C_s, \quad (7)$$

где λ – постоянная радиоактивного распада, год⁻¹;

μ – относительный прирост массы рыбы, год⁻¹, порядок его расчета описан в публикации [11], данные о зависимости массы пикши от ее возраста взяты из публикации [12];

$\mu = 0,25$ год⁻¹ для пикши массой 2 кг;

$CF_{f,s}$ – равновесный коэффициент перехода ¹³⁷Cs из донных отложений в корм пикши – моллюсков и бентосную фауну;

ε – параметр, характеризующий метаболизм и обмен ¹³⁷Cs в организме рыбы, сут⁻¹, порядок его расчета в зависимости от массы рыбы и температуры воды описан в публикации [11];

$\varepsilon = 0,42$ год⁻¹ для пикши массой 2 кг.

Равновесный коэффициент перехода ¹³⁷Cs из донных отложений в моллюсков и бентосную фауну Баренцева моря составляет 0,12 [13].

Пикша (*Melanogrammus aeglefinus*) относится к семейству тресковых и является важным промысловым видом рыб Баренцева моря. Нерест пикши происходит в Норвежском море, возле Лофотенских островов. Икра пелагическая, молодь пикши заносится в Баренцево море Нордкапским течением. Пикша ведет придонный образ жизни, питаясь преимущественно бентосной фауной; половой зрелости достигает в 5–7 лет. Пикша Баренцева моря совершает значительные сезонные миграции, в декабре – январе уходя на нерест, который происходит в апреле – мае. Во время нерестовой миграции пикша проходит расстояние до 1 000 км в течение четырех – пяти месяцев. Нерест занимает несколько недель, после нереста пикша возвращается к местам нагула в Баренцево море. Продолжительность жизни пикши 12–15 лет.

При расчетах предполагалось нахождение и питание пикши в районе высокого загрязнения донных отложений размером 200 м на протяжении от одних суток до трех месяцев. При этом происходит ее включение в бентосную цепочку биологического переноса и миграции ¹³⁷Cs, что позволяет оценить максимально возможный уровень накопления ¹³⁷Cs в промысловой рыбе-бентофаге (пикше) для данного сценария аварии. Когда пикша находится вблизи пятна загрязнения, удельная активность ¹³⁷Cs в ней рассчитывается по формуле (7). Когда пикша не находится вблизи пятна загрязнения, снижение накопленной в ней удельной активности ¹³⁷Cs рассчитывается с помощью уравнения (7), где принимается $C_s = 0$.

Доза облучения человека (Зв) от потребления рыбы, накопившей ¹³⁷Cs за время пребывания вблизи пятна загрязнения донных отложений, вычислялась по формуле:

$$D = \varepsilon_{ing} \cdot M_e \cdot C_p, \quad (8)$$

где $\varepsilon_{ing} = 1,3 \cdot 10^{-8}$ Зв/Бк – дозовый коэффициент при пищевом поступлении ¹³⁷Cs в организм человека [14];

M_e – масса потребленной рыбы, кг;

C_p – удельная активность ¹³⁷Cs в рыбе, Бк/кг.

Оценивалась доза от потребления человеком одной особи пикши массой 2 кг. Съедобная часть пикши составляет 60,6 % [15], тогда $M_e = 1,2$ кг.

3. Результаты

По расчетным оценкам загрязнение ^{137}Cs донных отложений на расстоянии до 200 м от места аварии при отсутствии мер по реабилитации за 9 лет снижается от 1,2 до 0,6 МБк/кг. Результат модельного расчета динамики загрязнения ^{137}Cs придонной рыбы (пикши) Баренцева моря для рассмотренного гипотетического сценария аварии на затонувшей атомной подводной лодке К-159 представлен на рис. 1. Момент гипотетического аварийного загрязнения предполагался 1 июня, время нахождения пикши непосредственно вблизи пятна загрязнения (до 200 м от места аварии) – от одних суток до трех месяцев в период с 1 июля.

На рис. 1 показана динамика удельной активности ^{137}Cs в пикше в зависимости от длительности нахождения возле загрязненного участка донных отложений. Максимальный уровень загрязнения ^{137}Cs пикши при пребывании вблизи пятна загрязнения на протяжении одних суток составляет 260 Бк/кг (снижаясь через год после аварии до 150 Бк/кг), одной недели – 1 900 Бк/кг, двух недель – 3 900 Бк/кг. При нахождении вблизи пятна загрязнения на протяжении одного месяца максимальный уровень расчетного загрязнения пикши составляет 7 800 Бк/кг, двух месяцев – 15 000 Бк/кг, трех месяцев – 22 000 Бк/кг.

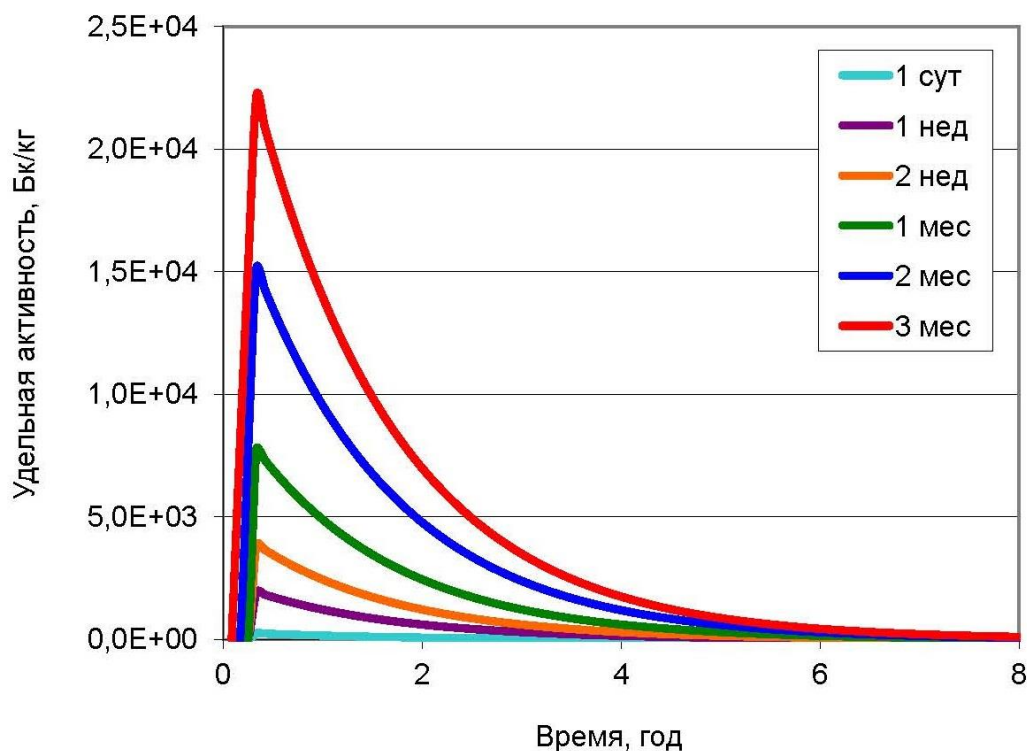


Рис. 1. Расчетная зависимость удельной активности ^{137}Cs в пикше после аварии от времени нахождения возле загрязненного участка донных отложений (от одних суток до трех месяцев)

Гигиенический норматив по содержанию ^{137}Cs в рыбе составляет 130 Бк/кг [16]. На рис. 1 видно, что если пикша провела вблизи загрязненного участка донных отложений одни сутки и включилась в бентосную цепочку переноса радионуклидов, то удельная активность ^{137}Cs в ней снизится до уровня 130 Бк/кг через полтора года после загрязнения, одну неделю – через 4 года, две недели – через 5 лет, один месяц – через 6 лет, три месяца – через 7 лет после загрязнения. Вылов такой рыбы может быть произведен в разных частях акватории Баренцева моря в зависимости от сезонных миграций пикши, в т. ч. на значительном удалении от загрязненного участка.

На рис. 2 показан результат модельного расчета динамики загрязнения ^{137}Cs пикши Баренцева моря после ее нахождения вблизи пятна загрязнения в течение одного месяца (июль) в разные годы после рассмотренной гипотетической аварии. Предполагается, что источником поступления ^{137}Cs в пикшу является ее пища – бентосная фауна, которая, в свою очередь, накапливает ^{137}Cs из донных отложений. Снижение максимальных уровней загрязнения пикши обусловлено снижением удельной активности ^{137}Cs в донных отложениях.

На рис. 3 показана расчетная зависимость максимального за год уровня загрязнения ^{137}Cs компонентов морской экосистемы – донных отложений, бентосной фауны и пикши (рыбы-бентофага) в зависимости от времени после гипотетической аварии. Результаты расчета для донных отложений и бентосной фауны на рис. 3 представлены для участка, непосредственно вблизи места аварии (до 200 м); для пикши – при условии ее нахождения в течение 1 месяца вблизи места аварии (июль).

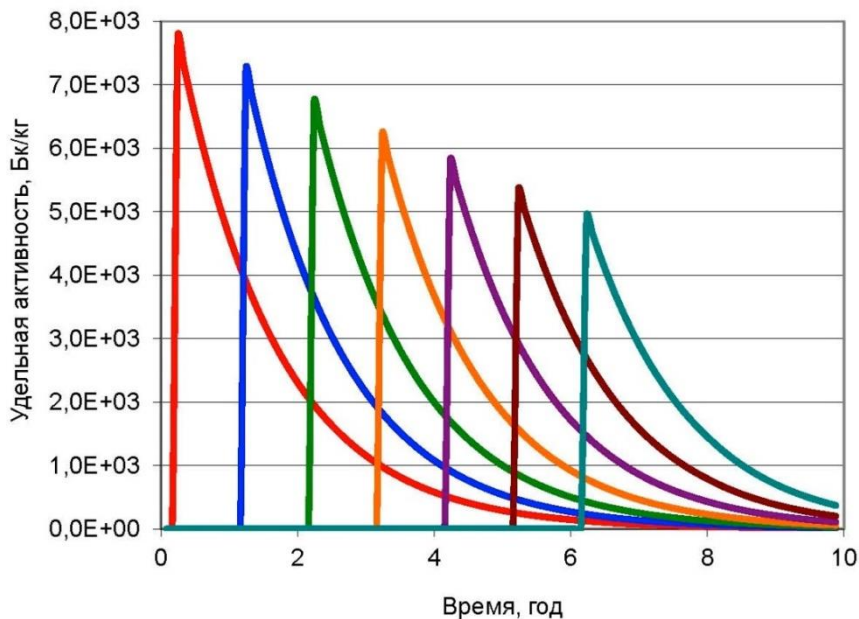


Рис. 2. Динамика загрязнения ^{137}Cs пикши Баренцева моря после ее нахождения вблизи пятна загрязнения в течение одного месяца в разные годы после аварии

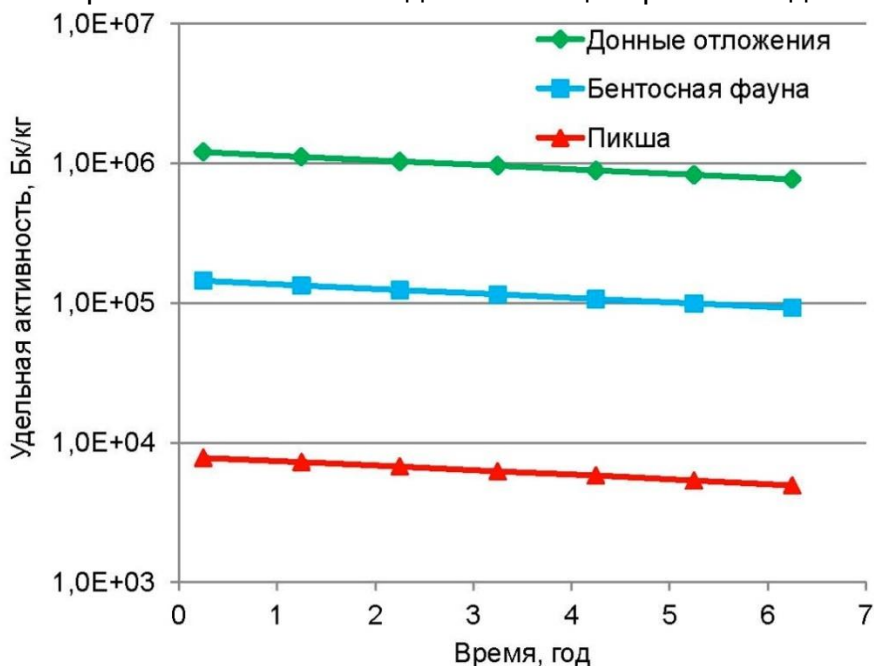


Рис. 3. Расчетная зависимость максимального за год уровня загрязнения ^{137}Cs компонентов морской экосистемы в зависимости от времени после аварии

В соответствии с модельным расчетом при удалении от места аварии загрязнение ^{137}Cs донных отложений значительно снижается. Поэтому снижаются и уровни содержания радионуклида в компонентах бентосной пищевой цепочки. На рис. 4 показан результат расчета динамики удельной активности ^{137}Cs в пикше после ее пребывания на протяжении одного – трех месяцев на расстоянии 2 км от места аварии. Максимальный расчетный уровень содержания ^{137}Cs в пикше в этом случае составляет 9 Бк/кг, через 3 года после аварии – 1,5 Бк/кг. Таким образом, кратковременное пребывание пикши на расстоянии 2 км от источника загрязнения при рассмотренном сценарии аварии не приведет к загрязнению рыбы ^{137}Cs до уровней, превышающих санитарный норматив.

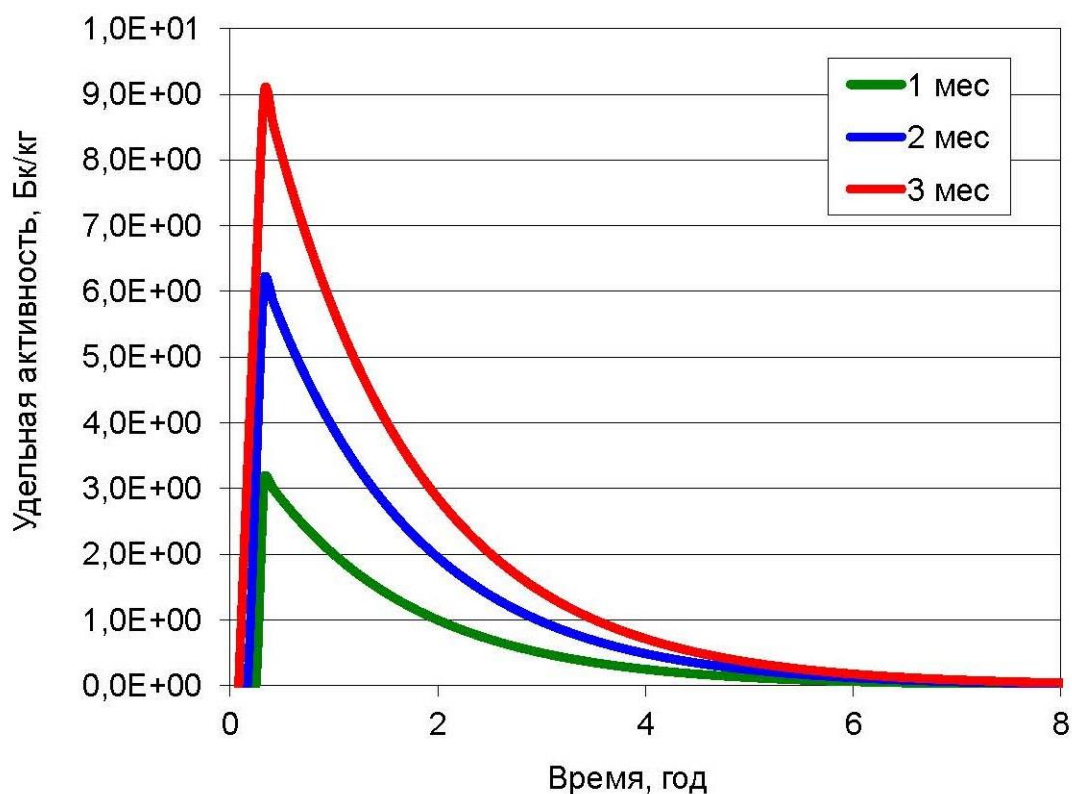


Рис. 4. Динамика удельной активности ^{137}Cs в пикше после ее пребывания на протяжении одного – трех месяцев на расстоянии 2 км от места аварии

На рис. 5 показан результат расчета максимального за год уровня загрязнения ^{137}Cs компонентов морской экосистемы – донных отложений и бентосной фауны на расстоянии 2 км от места аварии и пикши после нахождения в течение одного месяца на расстоянии 2 км от места аварии (в зависимости от времени после аварийного загрязнения). Удельная активность ^{137}Cs в донных отложениях на этом участке снижается за 9 лет с 500 до 250 Бк/кг, что ниже критерия отнесения к твердым радиоактивным отходам для данного радионуклида (10 000 Бк/кг). Расчетная удельная активность ^{137}Cs в бентосной фауне, постоянно обитающей на расстоянии 2 км от источника загрязнения, не превышает 100 Бк/кг. Расчетная максимальная удельная активность ^{137}Cs в пикше после ее временного нахождения на расстоянии 2 км от места аварии находится в диапазоне 2–3 Бк/кг. Современные уровни содержания ^{137}Cs в рыбе Баренцева моря составляют 0,1–0,3 Бк/кг [17, 18].

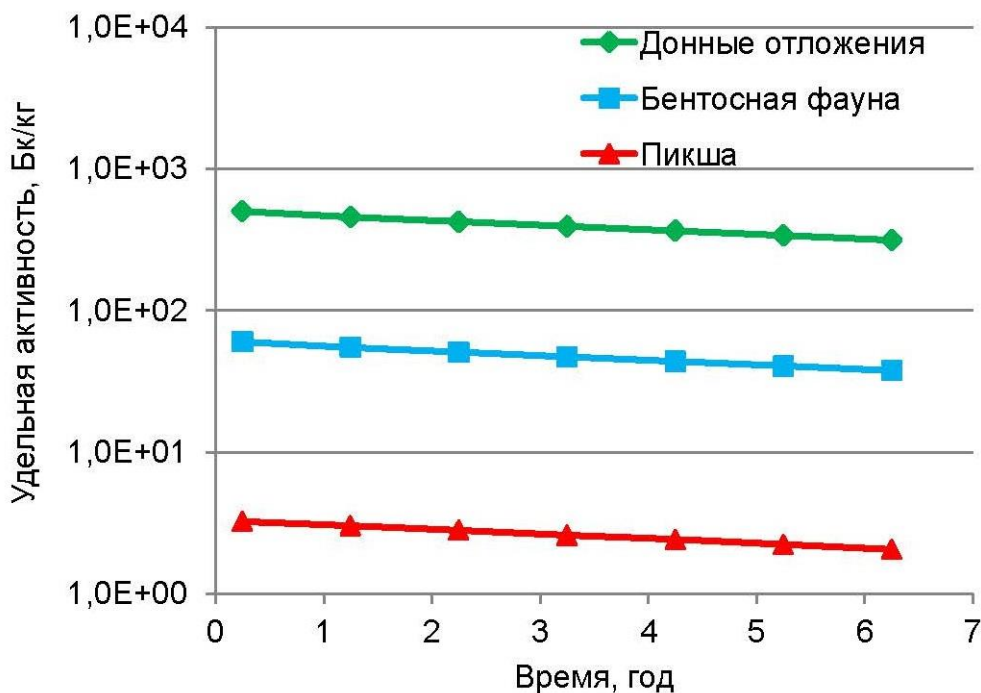


Рис. 5. Удельная активность ^{137}Cs в донных отложениях и бентосной фауне на расстоянии 2 км от места аварии и в пикше после ее нахождения в течение одного месяца на расстоянии 2 км от места аварии (расчет по модели)

Доза облучения человека от потребления одной особи пикши массой 2 кг, накопившей ^{137}Cs в результате нахождения от одних суток до трех месяцев вблизи пятна загрязнения донных отложений после гипотетической аварии на затонувшей атомной подводной лодке К-159, вычислена по формуле (8). В течение первого года после аварии максимальная доза от потребления одной выловленной особи пикши, проведенной одни сутки вблизи пятна загрязнения, оценена равной 0,004 мЗв, одну неделю – 0,03 мЗв, две недели – 0,06 мЗв, один месяц – 0,12 мЗв, два месяца – 0,23 мЗв, три месяца – 0,35 мЗв.

4. Обсуждение

Выполненные оценки демонстрируют важность использования динамической модели для расчета радиоэкологических и радиационно-гигиенических последствий морской аварии. В течение нескольких лет с момента аварийного поступления радионуклидов в море отсутствует равновесие в распределении радиоактивности между компонентами морской экосистемы (вода, донные отложения, рыба). Поэтому в случае морской аварии оценка и прогноз удельной активности ^{137}Cs в рыбе путем умножения объемной активности в воде на равновесное (табличное) значение коэффициента накопления ^{137}Cs в рыбе приведет к некорректному результату – очищение морской воды происходит значительно быстрее, чем выведение ^{137}Cs из организма рыбы. По этой же причине некорректно использовать значения контрольных уровней содержания ^{137}Cs в морской воде и донных отложениях [19, 20] для оценки радиоэкологических последствий морской аварии, эти значения были получены в предположении наличия равновесия в распределении радиоактивности между компонентами морской экосистемы, чего нет на протяжении нескольких лет после аварийного загрязнения.

Загрязнение ^{137}Cs донных отложений в отсутствии мер по реабилитации сохраняется на протяжении длительного времени после аварии. При рассмотренном сценарии гипотетической аварии с атомной подводной лодкой К-159 расчетный

уровень загрязнения ^{137}Cs донных отложений на расстоянии до 200 м от места аварии может достигать 1,2 МБк/кг, что, в свою очередь, приводит к высокому уровню загрязнения ^{137}Cs бентосной фауны, постоянно обитающей вблизи пятна загрязнения. Эти морские организмы не используются в пищу населением, однако они являются связующим звеном в цепочке накопления ^{137}Cs между загрязненными донными отложениями и пикшей, промысловым видом рыб Баренцева моря, ведущей придонный образ жизни и совершающей значительные сезонные миграции. Таким образом, в случае наличия на дне Баренцева моря долговременного источника радиоактивного загрязнения (^{137}Cs в донных отложениях) необходимо проводить оценку перехода радионуклида непосредственно из донных отложений в бентосную фауну. За счет встраивания в бентосную пищевую цепочку ^{137}Cs переходит в рыбу, совершающую сезонные миграции, и может быть обнаружен в рыбе даже на большом расстоянии от места аварийного загрязнения, где объемные активности ^{137}Cs в воде не превышают фоновых значений.

Максимальный уровень загрязнения ^{137}Cs пикши при пребывании вблизи пятна загрязнения в течение одного месяца через один год после аварии оценен равным 7 800 Бк/кг, через два года – 7 300 Бк/кг, через пять лет – 6 700 Бк/кг (рис. 2). Таким образом, на протяжении нескольких лет после гипотетической аварии с атомной подводной лодкой К-159 кратковременное пребывание пикши возле загрязненного участка донных отложений может повлечь ее включение в бентосную цепочку переноса ^{137}Cs и накопление этого радионуклида в рыбе-бентофаге выше нормативного уровня.

Моделирование накопления ^{137}Cs в основном промысловом виде рыб Баренцева моря – треске (*Gadus morhua*) – для сценария аварийного загрязнения требует отдельного исследования, поскольку эта рыба меняет тип питания за время жизни. Взрослая треска является хищной рыбой, слабо связанной с бентосной пищевой цепочкой, основу ее рациона составляют пелагические виды рыб (мойва, сельдь, сайка) [6].

Размер участка донных отложений с высоким уровнем загрязнения ^{137}Cs вблизи места аварии не превысит 200 м, поэтому повышенные уровни накопления ^{137}Cs в отдельных особях пикши возможны только при ее случайном нахождении вблизи этого небольшого загрязненного участка в период с июля по сентябрь. На расстоянии 2 км от места аварии расчетная удельная активность ^{137}Cs в донных отложениях ниже критерия отнесения к твердым радиоактивным отходам. Максимальный расчетный уровень загрязнения пикши ^{137}Cs при ее краткосрочном нахождении на расстоянии 2 км от места аварии не превышает установленный санитарно-гигиенический норматив.

Поступление ^{137}Cs в организм человека при рассмотренном сценарии аварии возможно при случайном вылове рыбы, которая в летнее время непродолжительное время находилась вблизи пятна загрязнения донных отложений. Показано, что вылов и потребление одной особи пикши среднего размера (масса 2 кг), проведенной 3 месяца вблизи пятна загрязнения, приведет к формированию дозы 0,35 мЗв, что ниже дозовой квоты для населения 1 мЗв. Однако выполненные оценки показывают необходимость детального анализа возможности биологического переноса ^{137}Cs и других долгоживущих радионуклидов мигрирующими промысловыми видами рыб арктических морей в случае обнаружения или прогноза высоких уровней загрязнения даже небольших участков морских донных отложений.

5. Выводы

1. Разработана динамическая модель, позволяющая рассчитать накопление ^{137}Cs в рыбе Баренцева моря после аварийного загрязнения.
2. Модель применена для оценки накопления и максимальных уровней загрязнения пикши Баренцева моря для сценария гипотетической аварии с затонувшей атомной подводной лодкой К-159.

3. Загрязнение донных отложений ^{137}Cs может сохраняться на протяжении длительного времени после аварии, что приведет к поступлению радионуклида в промысловый вид рыб по бентосной пищевой цепочке: донные отложения – бентосная фауна – пикша.

4. Размер участка донных отложений с высоким уровнем загрязнения ^{137}Cs вблизи места аварии оценен в 200 м, поэтому повышенные уровни накопления ^{137}Cs в отдельных особях пикши возможны только при ее случайном нахождении вблизи небольшого загрязненного участка.

5. После нахождения пикши в течение одной недели вблизи загрязненного участка донных отложений удельная активность ^{137}Cs в ней превысит санитарно-гигиенический норматив и снизится до его уровня только через 4 года после аварии. Из-за сезонных миграций пикши вылов такой рыбы может быть произведен в разных частях акватории Баренцева моря, в т. ч. на значительном удалении от загрязненного участка.

6. Содержание ^{137}Cs в пикше при ее краткосрочном нахождении на расстоянии 2 км от места аварии не превысит установленный санитарно-гигиенический норматив и незначительно превысит современные фоновые уровни содержания ^{137}Cs в рыбе Баренцева моря.

7. Расчетная доза облучения человека от потребления одной выловленной особи пикши, проведшей непродолжительное время (от одних суток до трех месяцев) вблизи пятна загрязнения донных отложений после аварии, находится в диапазоне 0,004–0,35 мЗв, что ниже годовой дозовой квоты для населения.

8. Необходимо проведение анализа возможности биологического переноса ^{137}Cs и других долгоживущих радионуклидов мигрирующими промысловыми видами рыб арктических морей в случае обнаружения или прогноза высоких уровней загрязнения даже небольших участков морских донных отложений.

6. Список литературы

1. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию: Радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря («Белая книга–2000») / С. М. Вакуловский, А. П. Васильев, В. Л. Высоцкий [и др.]. – М. : ИздАТ, 2005. – 624 с. – ISBN 5-86656-181-6. – EDN QKOFYF.
2. Атомное наследие холодной войны на дне Арктики: Радиологические и технико-экономические проблемы радиационной реабилитации морей / А. А. Саркисов, Ю. В. Сивинцев, В. Л. Высоцкий, В. С. Никитин. – М. : ИБРАЭ РАН, 2015. – 699 с. – ISBN 978-5-9907220-0-2. – EDN XMNHNR.
3. Прогноз и оценка радиоэкологических последствий гипотетической аварии на затонувшей в Баренцевом море атомной подводной лодке Б-159 / С. В. Антипов, В. П. Билашенко, В. Л. Высоцкий [и др.] // Атомная энергия. – 2015. – Т. 119, № 2. – С. 106–113. – EDN UEKIWZ.
4. Прогноз радиоэкологических последствий гипотетических аварий на ядерных и радиационно опасных объектах, находящихся на дне Баренцева и Карского морей / А. А. Саркисов, С. В. Антипов, В. Л. Высоцкий [и др.] // Атомная энергия. – 2018. – Т. 125, № 6. – С. 343–350. – EDN YVDCBF.
5. Катков, А. Е. Введение в региональную радиоэкологию моря / А. Е. Катков. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 160 с.
6. Долгов, А. В. Состав, формирование и трофическая структура ихтиоценов Баренцева моря / А. В. Долгов. – Мурманск : ПИНРО, 2016. – 336 с. – ISBN 978-5-86349-223-0.
7. Юрезанская, Ю. С. Моделирование переноса взвешенных веществ на океаническом шельфе / Ю. С. Юрезанская, В. Н. Котеров. – М. : Lambert Academic Publishing, 2011. – 116 с. – ISBN 978-3-8443-5430-0.
8. Шилова, Н. А. Особенности расчета гидравлической крупности частиц при моделировании начальной концентрации взвешенных веществ в приустьевых районах арктических морей / Н. А. Шилова, И. И. Студенов // Arctic Environmental Research. – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 295–307. – DOI 10.17238/issn2541-8416.2017.17.4.295. – EDN YWKJSU.

9. *Kryshev, A. I.* A dynamic model of ^{137}Cs accumulation by fish of different age classes / A. I. Kryshev, I. N. Ryabov // J. of Environmental Radioactivity. – 2000. – Vol. 50, No 3. – P. 221–233. – DOI 10.1016/S0265-931X(99)00118-6. – EDN LGHCPD.
10. *Сазыкина, Т. Г.* Моделирование радиоэкологических процессов в окружающей среде / Т. Г. Сазыкина, А. И. Крышев, И. И. Крышев. – М. : ООО «Маска», 2022. – 638 с. – EDN AFREHA.
11. 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 / A. I. Kryshev, T. G. Sazykina, M. N. Katkova [et al.] // J. of Environmental Radioactivity. – 2022. – Vol. 244–245. – P. 106825. – DOI 10.1016/j.jenvrad.2022.106825. – EDN NDFOMV.
12. StoX applied to cod and haddock data from the Barents Sea NOR-RUS ecosystem cruise in autumn / E. Johannesen, E. Johnsen, G. O. Johansen, K. Korsbrekke // Institute of Marine Research Report Series, Fisken og Havet, No. 2019-6. ISSN 1894-5031. Bergen: Institute for Marine Research, 2019. – 40 p.
13. *Росновская, Н. А.* Определение в воде и донных отложениях Баренцева моря контрольных уровней содержания радионуклидов, обеспечивающих приемлемый экологический риск / Н. А. Росновская, А. И. Крышев, И. И. Крышев // Морской биологический журнал. – 2022. – Т. 7. – № 4. – С. 70–80. – DOI 10.21072/mbj.2022.07.4.06. – EDN UEMHKS.
14. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009 – 100 с.
15. Единые нормы отходов, потерь, выхода готовой продукции и расхода сырья при производстве пищевой продукции и морских гидробионтов. – М. : Госкомрыболовство, 2002. – 46 с.
16. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (СанПиН 2.3.2.1078-01): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М. : Роспотребнадзор, 2001. – 269 с.
17. Динамика искусственных радионуклидов в экосистемах морей Северного Ледовитого океана на рубеже XX–XXI веков. Часть 1. Морская вода и биота / Г. Г. Матишов, Г. В. Ильин, И. С. Усягина, Е. Э. Кириллова // Наука Юга России. – 2019. – Т. 15, № 3. – С. 12–23. – DOI 10.7868/S25000640190302. – EDN LUFDDP.
18. AMAP Assessment 2015: Radioactivity in the Arctic. Oslo : Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2016. – 89 p.
19. Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в морских водах. Рекомендации Росгидромета. Р 52.18.852-2016. – Обнинск : НПО «Тайфун», 2016. – 20 с.
20. Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в донных отложениях морских водных объектов. Рекомендации Росгидромета. Р 52.18.873-2018. – Обнинск : НПО «Тайфун», 2019. – 29 с.

Сведения об авторах:

Крышев Александр Иванович, д. б. н., ведущий научный сотрудник ФГБУ «НПО «Тайфун», г. Обнинск, ул. Победы, 4, 249037, Россия. Эл. почта: ecomod@yandex.ru
Сазыкина Татьяна Григорьевна, д. ф.-м. н., главный научный сотрудник ФГБУ «НПО «Тайфун», г. Обнинск, Россия

CALCULATION OF THE MAXIMUM ACCUMULATION LEVELS AND BIOLOGICAL TRANSFER OF ^{137}Cs IN THE BARENTS SEA FISH FOR SCENARIO OF THE HYPOTHETICAL ACCIDENT WITH THE SUNKEN NUCLEAR SUBMARINE “K-159”

A. I. Kryshev, T. G. Sazykina

Research and Production Association “Typhoon”, Obninsk, Russia

*The maximum levels and dynamics of ^{137}Cs contamination of a commercial benthic fish species (haddock, *Melanogrammus aeglefinus*) were assessed for the scenario of a hypothetical accident with the sunken nuclear submarine K-159 in the Barents Sea. Contamination of bottom sediments near the accident site was calculated. Dynamic model of ^{137}Cs accumulation in haddock in the Barents Sea was developed, taking into account its seasonal migrations. Contamination of bottom sediments with ^{137}Cs can persist for a long time after the accident, leading to intake of the radionuclide into the commercial fish species through the benthic food chain "bottom sediments - benthic fauna - benthic fish". For the considered accidental scenario, the levels of ^{137}Cs in haddock, which exceed the sanitary and hygienic standard of 130 Bq/kg, are estimated if the fish spent from 1 day to 3 months near the contaminated area (up to 200 m from the accident site). Due to seasonal migrations of haddock, fish could be caught in different parts of the Barents Sea, including those located at a considerable distance from the contaminated area. The calculated activity concentration of ^{137}Cs in haddock after its short-term stay at a distance of 2 km from the accident site does not exceed 10 Bq/kg. During the first year after the accident, the calculated maximum dose from the consumption of one caught haddock weighing 2 kg, which spent 1 week near the highly contaminated spot, was estimated to be 0,03 mSv, 2 weeks – 0,06 mSv, 1 month – 0,12 mSv, 2 months – 0,23 mSv, 3 months – 0,35 mSv, which is below the annual dose quota for the population. The model results show the need to evaluate the biological transfer of ^{137}Cs by migratory commercial fish species of the Arctic seas in case of detection or prognosis of high levels of radioactive contamination in bottom sediments.*

Key words: Arctic; Barents Sea; radiation accident; K-159; ^{137}Cs ; model; bottom sediments; fish; haddock; dose.

References

1. Tekhnogennyye radionuklidy v moryah, omyvayushchih Rossiyu: Radioekologicheskie posledstviya udaleniya radioaktivnyh othodov v arkticheskie i dal'nevostochnye morya («Belaya kniga–2000») / S. M. Vakulovskij, A. P. Vasil'ev, V. L. Vysockij [et al.]. – M. : Izdat, 2005. – 624 p. – ISBN 5-86656-181-6. – EDN QKOFYF (in Russian).
2. Atomnoe nasledie holodnoj vojny na dne Arktiki: Radiologicheskie i tekhniko-ekonomicheskie problemy radiacionnoj rehabilitacii morej / A. A. Sarkisov, YU. V. Sivincev, V. L. Vysockij, V. S. Nikitin. – M. : IBRAE RAS, 2015. – 699 p. – ISBN 978-5-9907220-0-2. – EDN XMNHNR (in Russian).
3. Prediction and evaluation of the radioecological consequences of a hypothetical accident on the sunken nuclear submarine B-159 in the Barents sea / S. V. Antipov, V. P. Bilashenko, V. L. Vysotskii [et al.] // Atomic energy. – 2015. – Vol. 119, № 2. – P. 106–113. – EDN UEKIWZ.
4. Forecast of radio-ecological consequences of hypothetical accidents at nuclear-and radiation-hazardous facilities located at the bottom of the Barents and Kara seas / A. A. Sarkisov, S. V. Antipov, V. L. Visotskii [et al.] // Atomic energy. – 2018. – Vol. 125, № 6. – P. 343–350. – EDN YVDCBF.
5. Katkov, A. E. Vvedenie v regional'nyu radioekologiyu morya / A. E. Katkov. – M. : Energoatomizdat, 1985. – 160 c (in Russian).
6. Dolgov, A. V. Composition, formation and trophic structure of the Barents sea fish communities / A. V. Dolgov. – Murmansk : PINRO, 2016. – 336 p. – ISBN 978-5-86349-223-0.

7. Yurezanskaya, Yu. S. Modelirovanie perenosa vzveshennyh veshchestv na okeanicheskom shelfe / Yu. S. Yurezanskaya, V. N. Koterov. – M. : Lambert Academic Publishing, 2011. – 116 p. – ISBN 978-3-8443-5430-0 (in Russian).
8. Shilova, N. A. Osobennosti rascheta gidravlicheskoj krupnosti chastic pri modelirovanii nachal'noj koncentracii vzveshennyh veshchestv v priust'evykh rajonah arkticheskikh morej / N. A. Shilova, I. I. Studyonov // Arctic Environmental Research. – 2017. – Vol. 17, № 4. – С. 295–307. – DOI 10.17238/issn2541-8416.2017.17.4.295. – EDN YWKJSU (in Russian).
9. Kryshev, A. I. A dynamic model of ^{137}Cs accumulation by fish of different age classes / A. I. Kryshev, I. N. Ryabov // J. of Environmental Radioactivity. – 2000. – Vol. 50, No 3. – P. 221–233. – DOI 10.1016/S0265-931X(99)00118-6. – EDN LGHCPD.
10. Sazykina, T. G. Modelirovanie radioekologicheskikh processov v okruzhayushchej srede / T. G. Sazykina, A. I. Kryshev, I. I. Kryshev. – M. : ООО «Маска», 2022. – 638 с. – EDN AFREHA (in Russian).
11. 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 / A. I. Kryshev, T. G. Sazykina, M. N. Katkova [et al.] // J. of Environmental Radioactivity. – 2022. – Vol. 244–245. – P. 106825. – DOI 10.1016/j.jenvrad.2022.106825. – EDN NDFOMV.
12. StoX applied to cod and haddock data from the Barents Sea NOR-RUS ecosystem cruise in autumn / E. Johannesen, E. Johnsen, G. O. Johansen, K. Korsbrekke // Institute of Marine Research Report Series, Fisken og Havet, No. 2019-6. ISSN 1894-5031. Bergen: Institute for Marine Research, 2019. – 40 p.
13. Rosnovskaya, N. A. Determination of control levels of radionuclides ensuring acceptable environmental risk in the Barents sea water and bottom sediments / N. A. Rosnovskaya, A. I. Kryshev, I. I. Kryshev // Marine Biological Journal. – 2022. – Vol. 7. – № 4. – P. 70–80. – DOI 10.21072/mbj.2022.07.4.06. – EDN UEMHKS.
14. Normy radiacionnoj bezopasnosti (NRB-99/2009). Sanitarnye pravila i normativy / SanPin 2.6.1.2523-09. – M.: Minzdrav Rossii, 2009. – 100 p. (in Russian).
15. Edinye normy othodov, poter', vyhoda gotovoj produkcii i raskhoda syr'ya pri proizvodstve pishchevoj produkcii i morskikh gidrobiontov. – M. : Goskomrybolovstvo, 2002. – 46 p. (in Russian).
16. Gigienicheskie trebovaniya bezopasnosti i pishchevoj cennosti pishchevyh produktov (SanPiN 2.3.2.1078-01): Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy. – M. : Rospotrebnadzor, 2001. – 269 p. (in Russian).
17. Dynamics of artificial radionuclides in the ecosystems of seas of the Arctic ocean at the turn of the 21st century. Part 1. Seawater and biota / G. G. Matishov, G. V. Ilyin, I. S. Usyagina, E. E. Kirillova // Science in the South Russia. – 2019. – Vol. 15, № 3. – P. 12–23. – DOI 10.7868/S25000640190302. – EDN LUFDDP.
18. AMAP Assessment 2015: Radioactivity in the Arctic. Oslo : Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2016. – 89 p.
19. Poryadok rascheta kontrol'nyh urovnej sodержaniya radionuklidov v morskikh vodah. Rekomendacii Rosgidrometa. R 52.18.852-2016. – Obninsk: NPO «Taifun», 2016. – 20 p.
20. Poryadok rascheta kontrol'nyh urovnej sodержaniya radionuklidov v donnyh otlozheniyah morskikh vodnyh ob"ektov. Rekomendacii Rosgidrometa. P 52.18.873-2018. – Obninsk : NPO «Taifun», 2019. – 29 с.