

ДИНАМИКА КОЭФФИЦИЕНТА НАКОПЛЕНИЯ ^{137}Cs У РЫБ I – II ТРОФИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КОНЦЕНТРАЦИИ РАДИОНУКЛИДА В ВОДЕ ПРЕСНОВОДНЫХ ВОДОЕМОВ

В. В. Беляев, Е. Н. Волкова

Институт гидробиологии НАН Украины, Киев

Методами математического моделирования изучена динамика величины коэффициента накопления ^{137}Cs у «мирных» видов рыб при временном увеличении концентрации радионуклида в воде пресноводных водоемов. Определена вероятность несовпадения величин мгновенных и равновесного коэффициентов накопления при однократном повышении концентрации ^{137}Cs в воде.

Ключевые слова: рыбы, коэффициент накопления, ^{137}Cs .

Одним из негативных последствий использования ядерной энергии является прогрессирующее радиоактивное загрязнение окружающей среды. При штатной безаварийной работе ядерных установок некоторое количество продуктов активации и деления ядерного топлива проникает за пределы физической и биологической защиты. Многочисленными исследованиями установлено, что конечным звеном миграции радионуклидов являются водные экосистемы [1, 2].

Ограничение выбросов и сбросов АЭС лимитируется квотой облучения человека от данного объекта [3, 4]. Пределы загрязнения водных объектов рассчитываются по дозе облучения, которую может получить человек при употреблении воды или продуктов аквакультуры. При хроническом загрязнении водных экосистем низкоактивными сбросами или поверхностным стоком значительную роль в формировании дозы облучения населения играет ^{137}Cs . Для этого радионуклида нормирование по загрязнению продуктов аквакультуры более жесткое, чем нормирование по поступлению с питьевой водой. Как правило, загрязнение рыбной продукции рассчитывают по коэффициентам накопления (Кн) [5 - 8]. В водной радиэкологии Кн определяют как отношение удельной активности радионуклида в организме к удельному содержанию в воде.

В стационарных условиях максимальные уровни накопления и, соответственно, Кн совпадают с равновесными (предельными).

В естественных водоемах концентрация радионуклидов в воде в течение года может отличаться в десятки раз [9 - 12]. В случае изменения уровней содержания радионуклидов в воде возникают методические проблемы в определении величины Кн.

Одним из примеров использования Кн при нормировании радиоактивного загрязнения водных объектов является ДСТУ 4742:2007 [8],

согласно которому выводятся из оборота рыбохозяйственные водоемы и водоемы хозяйственного использования с концентрацией ^{137}Cs в воде более 0,031 или 0,015 Бк/л соответственно. Анализ сводных данных по радиоактивному загрязнению водных объектов Украины после аварии на ЧАЭС [9, 13, 14] показывает, что в значительной части водоемов содержание радионуклидов в воде превышало уровни, установленные вышеупомянутым ДСТУ. В то же время нами [15, 16] не зафиксировано превышения уровней содержания ^{137}Cs в рыбах водоемов лесостепной и степной зон Украины.

Цель нашего исследования – изучить динамику Кн ^{137}Cs рыбами нехищных видов при изменении удельного содержания этого радионуклида в воде – обусловлена необходимостью решения вопросов о правомерности применения величин Кн радионуклидов рыбами при разработке нормативных документов.

Материалы и методика исследований

Содержание ^{137}Cs в рыбах моделировалось на основании широко применяемой в радиэкологии многокомпонентной экспоненциальной модели [17 - 19], полученной при решении дифференциального уравнения первого порядка, описывающего изменение активности организма во времени. Ранее нами было детально описано решение этого уравнения при равномерном постоянном поступлении ^{137}Cs в организм рыб [20 - 22]:

$$A_i(t) = \sum A_i V T_i / \ln 2 [1 - \exp(-t \ln 2 / T_i)], \quad i = 1, 3, \quad (1)$$

где $A_i(t)$ – удельная активность радионуклида в организме, Бк/кг; A_i – парциальный вклад i -компоненты выведения, доли; V – скорость поступления (поток) радионуклида в организм рыбы, Бк/(кг · сут); T_i – период полувыведения i -компоненты из организма, сут.

Активность радионуклида в рыбе на каждые сутки представляли в виде суммы накопления за текущие сутки (формула 1) и активности на предшествующие сутки с учетом выведения. При этом учитывали парциальные вклады и скорость выведения компонент. На основании [20, 23, 24] и дополнительных экспериментальных исследований было установлено, что $A_1 \approx A_2 \approx 1/3 A_3$; $T_1 = 1$ сут, $T_2 = 10$ сут, $T_3 = 100$ сут.

При моделировании были приняты следующие ограничения: 1) масса рыбы и скорость выведения радионуклида постоянны; 2) скорость поступления радионуклида в организм (V) постоянна на протяжении суток; 3) поступление радионуклида в организм рыб прямо пропорционально концентрации радионуклида в воде.

Пути поступления ^{137}Cs в организм рыб (алиментарный или непосредственно из воды) в данной работе не рассматриваются, величина V характеризует суммарное поступление радионуклида в единицу времени; поступление радионуклида с водными массами в организм рыб рассмотрено нами в [22]. Изменение массы рыбы во времени частично учитывается выбором $V = \text{const}$. Изменением массы рыбы можно пренебречь при $d(\ln(A_f)) \gg d(\ln(m))$. Наши исследования по определению скорости снижения удельной активности рыб [25] показывают, что данное условие выполняется для рыб Киевского и Каневского водохранилищ, водоема-охладителя ЧАЭС и некоторых других водоемов.

Принимая во внимание то, что условие 3 может выполняться только для нехищных видов рыб (бентофагов, планктофагов и фитофагов), все рассуждения в рамках этой статьи относятся именно к таким видам рыб.

Необходимо отметить, что примененный подход численного расчета активности ^{137}Cs у рыб на каждые сутки позволяет учитывать не только равномерное изменение массы, но и изменение темпов роста рыб и скорости выведения радионуклида на разных стадиях развития.

Равновесный коэффициент накопления ($K(0)$) рассчитывался на основании формулы (1) при $t \gg T_3$ и V – как среднее ежесуточное потребление радионуклида.

В условиях переменного содержания радионуклида в воде и рыбе, а также растянутого во времени установления равновесного состояния между содержанием радионуклида в воде и рыбе K_n можно определить одним из следующих способов:

$$\begin{aligned} K(0) & - \text{равновесный коэффициент накопления,} \\ K_1(t) & = A_f(t)/A_w(t), \\ K_2(t) & = A_f(t)/\langle A_w(t) \rangle, \\ \langle K \rangle & = \langle A_f(t) \rangle / \langle A_w(t) \rangle, \end{aligned}$$

где $A_f(t)$ – удельное содержание радионуклида в рыбе в момент времени t ; $A_w(t)$ – удельное содержание радионуклида в воде в момент времени t ; $\langle A_f(t) \rangle$, $\langle A_w(t) \rangle$ – среднегодовая удельная активность радионуклида в рыбе и воде.

Вероятность несовпадений $\langle K_1(t) \rangle$ и $\langle K \rangle$ в данной работе не обсуждаются.

Так как формально задача изучения динамики K_n радионуклида рыбой при изменении поступления (концентрации в воде) совпадает с задачей радиотехники, изучающей параметры изменения входного сигнала после прохождения системы [26, 27], мы использовали стандартный метод радиотехники – подачу единичного прямоугольного импульса на вход системы. Внимание к изучению изменения формы единичного импульса при прохождении системы объясняется тем, что суммой единичных импульсов можно представить сигнал любой формы. Под единичным импульсом понимали кратковременное повышение концентрации радионуклида в воде на период до 30 сут. Длительность периода повышения и кратность (n , $n = A_w(1)/A_w(0)$) повышения концентрации радионуклида в воде выбирали на основании данных по содержанию радионуклидов в воде р. Припять и днепровских водохранилищах [9 - 12].

Результаты исследований и их обсуждение

Равновесное состояние между содержанием ^{137}Cs в воде и организме наступает не мгновенно, а через некоторое время. При заданных выше параметрах (A_i , T_i) активность рыбы будет отличаться от равновесной менее чем на 10 % через 320 сут и более (рис. 1). При этом доля быстрых компонент выведения в общей радиоактивности рыбы значительно уменьшается. Так, на 20-е сутки доля быстрых компонент выведения составляет менее 20 %, а активность только 15 % от равновесной. В равновесном состоянии вклад быстрых компонент выведения не превышает 5 %.

Рассмотрим динамику содержания ^{137}Cs в организме рыб при $n = 5$ и периоде повышения концентрации в воде 30 сут (рис. 2). В данном случае максимальная активность ^{137}Cs у рыб будет примерно в два раза выше первоначальной. Через год после повышения концентрации ^{137}Cs в воде активность радионуклида у рыб будет примерно на 8 % превышать первоначальную.

Для этого же случая поведение величины $K_2(t)$ совпадает с поведением $A_f(t)$ (рис. 3), так как $K_2(t) = A_f(t)/\langle A_w(t) \rangle$, а $\langle A_w(t) \rangle$ – усредненная величина и, по определению, в течение периода наблюдения постоянна. Гораздо сложнее поведение величины $K_1(t)$ (см. рис. 3). С увеличением

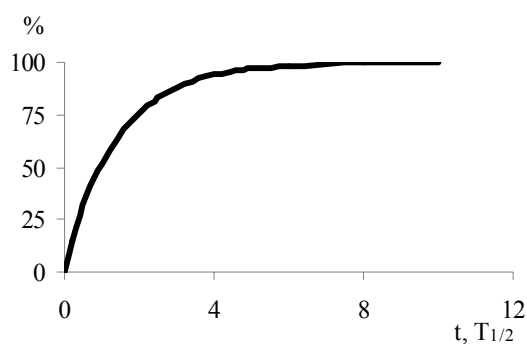


Рис. 1. Динамика содержания ^{137}Cs в организме рыб при постоянном равномерном поступлении радионуклида в организм ($T_{1/2}$ – период полувыведения медленной компоненты).

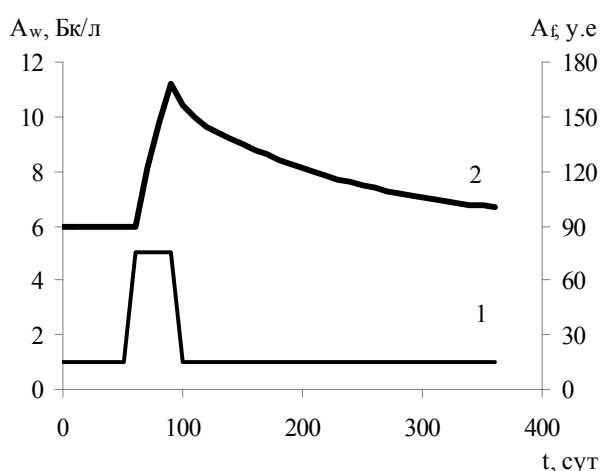


Рис. 2. Динамика содержания ^{137}Cs в организме рыб (A_f) при изменении концентрации радионуклида в воде (A_w), (1 – A_w ; 2 – A_f).

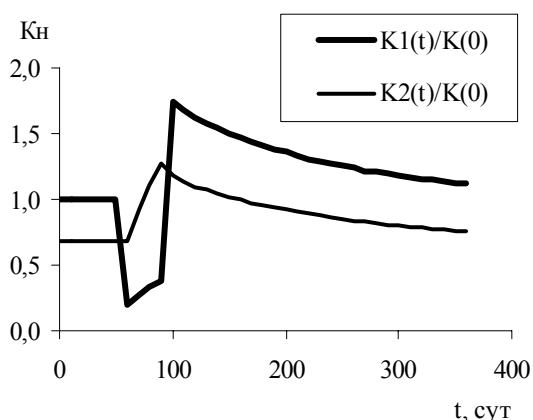


Рис. 3. Динамика K_n ^{137}Cs у рыб при изменении концентрации радионуклида в воде (динамика концентрации радионуклида в воде представлена на рис. 2).

концентрации радионуклида в воде величина $K_1(t)$ уменьшается до 0,2 величины $K(0)$. За период повышенного содержания радионуклида в воде величина $K_1(t)$ увеличивается в 1,9 раза.

Со снижением концентрации радионуклида в воде до первоначального уровня величина $K_1(t)$ увеличивается в 4,7 раза (от 0,38 до 1,75) и затем на протяжении более чем одного года приближается к равновесному значению.

Так как величина $K_1(t)$ прямо пропорциональна мгновенной концентрации радионуклида в организме и обратно пропорциональна мгновенной концентрации в воде, а содержание радионуклида в организме рыбы зависит от концентрации радионуклида в воде за предшествующий период, диапазон колебаний $K_1(t)$ превышает диапазон колебаний концентрации радионуклида в воде (табл. 1). Анализ данных табл. 1 показывает, что диапазон колебаний величины $K_1(t)$ сильно зависит от величины n . Так, при $n = 2$ (период увеличения концентрации 30 сут) величина $K_1(t)$ изменяется в 2,2 раза, при $n = 10$ – в 26 раз. Величина $K_2(t)$ меньше зависит от изменения концентрации радионуклида в воде. При $n = 10$ и периоде увеличения концентрации радионуклида в воде 30 сут величина $K_2(t)$ отличается от равновесного значения K_n не более чем на 50 %.

Таблица 1. Величины нормированного K_n (период повышения концентрации в воде 30 сут)

n	2	3	5	10
K_1	0,5 - 1,19	0,33 - 1,37	0,2 - 1,75	0,1 - 2,6
K_2	0,88 - 1,09	0,8 - 1,16	0,68 - 1,27	0,5 - 1,5

Величины усредненных K_n при временном повышении концентрации радионуклида в воде будут меньше величины $K(0)$. Так, при $n = 2$ и периоде от 10 до 30 сут величина среднего за год K_n будет составлять около 0,95 от величины $K(0)$ (рис. 4). С увеличением периода и степени увеличения концентрации ^{137}Cs в воде величина усредненного нормированного K_n будет уменьшаться. Так, величина усредненного K_n при $n = 10$ для периодов 10, 20 и 30 сут будет составлять 0,8, 0,72 и 0,67 величины $K(0)$ соответственно.

Анализ данных, представленных на рис. 3 показывает, что на протяжении значительного промежутка времени величины $K_1(t)$ и $K_2(t)$ отличаются от величины $K(0)$. В случае повышения концентрации ^{137}Cs в воде на период 30 сут и увеличении концентрации в воде в 3, 5 и 10 раз вероятность того, что величина $K_1(t)$ будет отличаться от $K(0)$ более чем на 60 % будет составлять 0,08, 0,17 и 0,50 соответственно (табл. 2).

Из этого следует, что в течение одного, двух или шести месяцев в году величины $K(0)$ и $K_1(t)$ будут значительно отличаться. Вероятность несовпадения величин $K_2(t)$ и $K(0)$ значительно

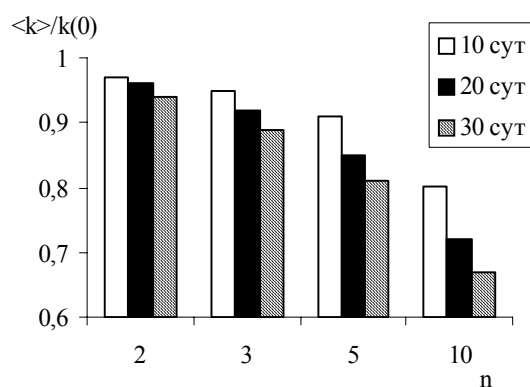


Рис. 4. Зависимость величины усредненного нормированного K_n от времени и степени (n) увеличения концентрации ^{137}Cs в воде.

Таблица 2. Вероятность несовпадения $K_1(t)$ и $K_2(t)$ с равновесным значением

$$P_1 = P\{|K(0) - K_1(t)| / K(0) > 30\% \};$$

$$P_2 = P\{|K(0) - K_1(t)| / K(0) > 60\% \};$$

$$P_3 = P\{|K(0) - K_2(t)| / K(0) > 30\% \};$$

$$P_4 = P\{|K(0) - K_2(t)| / K(0) > 60\% \};$$

период повышения концентрации в воде 30 сут)

N	2	3	5	10
P1	0,08	0,25	0,48	0,77
P2	0	0,08	0,17	0,50
P3	0	0	0	0,39
P4	0	0	0	0,17

меньше (см. табл. 2). Вероятность того, что $|K(0) - K_2(t)| > 30\%$ наблюдается только при десятикратном увеличении концентрации ^{137}Cs в воде.

Выводы

Расчеты показывают, что если период полувыведения медленной компоненты радионуклида из организма превышает 100 сут, а скорость поступления ^{137}Cs в организм рыб увеличивается более чем в два раза, равновесное состояние в системе «организм рыб – окружающая среда» устанавливается не менее чем через 1 год.

При однократном повышении концентрации радионуклида в воде на период 30 сут диапазон колебаний величины мгновенного K_n ^{137}Cs у рыб ($K_1(t)$) значительно превышает степень увеличения концентрации ^{137}Cs в воде.

Величина усредненного нормированного K_n ^{137}Cs рыбами уменьшается с увеличением времени и степени повышения концентрации радионуклида в воде. При десятикратном увеличении концентрации ^{137}Cs в воде на период 30 сут величина усредненного K_n составляет 0,67 от величины $K(0)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутлахмедов Ю.А., Поликарпов Г.Г., Кутлахмедова-Вишнякова Ю.В. Применение теории радиоемкости экосистем для экологического нормирования в водных экосистемах // Другий з'їзд гідроекологічного товариства України (Київ, 27 - 31 жовтня 1997 р.): Тез. доп. - К., 1997. - С. 167.
2. Трапезников А.В. Радиоэкология пресноводных экосистем (на примере Уральского региона): Автореф. дис. ... докт. биол. наук : спец. 03.00.16. "Экология". - Екатеринбург, 2001. - 48 с.
3. Гусев Н.Г., Беляев В.В. Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 224 с.
4. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97); Державні гігієнічні нормативи. - К.: Відділ поліграфії Українського центру держсанепіднагляду МОЗ України, 1997. - 22 с.
5. Марей А.Н. Санитарная охрана водоемов от загрязнений радиоактивными веществами - М.: Атомиздат, 1976. - 224 с.
6. Шеханова И.А. Радиоэкологические аспекты защиты поверхностных вод при мирном использовании ядерной энергии // Проблемы и задачи радиоэкологии животных. - М.: Наука, 1980. - С. 14 - 35.
7. Катков А.Е. Разработка оценочных критериев гигиенического нормирования радиоактивного загрязнения дна водоемов // Там же. - С. 43 - 68.
8. Система радіоекологічного моніторингу селітебних територій. Технічні умови: ДСТУ 4742:2007. - [Чинний від 2007-10-01]. - К.: Держспоживстандарт України, 2008. - 14 с. - (Національні стандарти України).
9. Радиогеоэкология водных объектов зоны влияния аварии на ЧАЭС / Под ред. О. В. Войцеховича. - К.: Чернобыльинтеринформ, 1997. - Т. 1 - 308 с.
10. Радиогеоэкология водных объектов зоны влияния аварии на Чернобыльской АЭС. Прогнозы загрязнения вод, оценки рисков водопользования и эффективности водоохраных контрмер для водных экосистем зоны влияния Чернобыльской аварии / Под ред. О. В. Войцеховича. - К.: Чернобыльинтеринформ, 1998. - Т. 2. - 277 с.
11. Казаков С.В., Марченко В.И. Радиационный стан зони відчуження // Бюлетень екологічного стану зони відчуження та безумовного (обов'язкового) відселення. - 2000. - № 15, березень. - С. 9 - 17.
12. Зарубин О.Л., Каневец В.В. Содержание радионуклидов в воде Каневского водохранилища после аварии на ЧАЭС 1986 г. // Зб. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2005. - № 3 (16). - С. 110 - 130.
13. Самойленко В.М. Кадастр радіоактивного забруднення водних об'єктів України місцевого водокористування. Т. 1. Радіогідроекологічний стан і використання водойм та загальнометодологічні проблеми - К.: Ніка-Центр, 1998. - 192 с.
14. Сніжко С.І., Орлов О.О. Гідрохімія та радіогеохімія річок і боліт Житомирської області. -

- Житомир: Волинь, 2002. - 262 с.
15. ^{137}Cs в «мирних» видах рыб водоемов разного типа / Е. Н. Волкова, В. В. Беляев, З. О. Широкая и др. // Зб. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2002. - № 1 (7). - С. 150 - 154.
 16. Волкова О.М., Беляев В.В., Кленус В.Г та ін. Радіоекологічні дослідження деяких річок Житомирської області // Там же. - 2006 - № 2 (18). - С. 110 - 114.
 17. Основы сельскохозяйственной радиологии / Б. С. Пристер, Н. А. Лоцинов, О. Ф. Немец, В. А. Поляков. - 2-е изд., переработ. и доп. - К.: Урожай, 1991. - 472 с.
 18. Егоров В.Н. Динамические закономерности радиохемозологических процессов в морской среде: Автореф. дис. ... докт. биол. наук : спец. 03.00.01. "Радиобиология". - К., 1987. - 33 с.
 19. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Математическое моделирование миграции радионуклидов в водных экосистемах. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 152 с.
 20. Беляев В.В. Накоплення та виведення цезію-137 з організму гідробіонтів: Автореф. дис. ... канд. біол. наук. - К., 2001. - 18 с.
 21. Беляев В.В., Волкова Е.Н. Роль компонент виведення ^{137}Cs в формуванні радіонуклідного забруднення рыб в природних умовах // Наук. зап. Тернопіл. держ. пед. ун-ту ім. Володимира Гнатюка. Сер. Біологія. Спеціальний випуск «Гідроекологія». - 2001. - № 4(15) - С. 4 - 6.
 22. Беляев В.В., Волкова Е.Н. Оценка поступления ^{137}Cs с водными массами в организм пресноводных рыб // Гидробиол. журн. - 2007. - Т. 43, № 3. - С. 112 - 116.
 23. Моделирование и изучение механизмов переноса радиоактивных веществ из наземных экосистем в водные объекты зоны влияния Чернобыльской аварии / Под ред. У. Сансоне и О. Войцеховича. - Чернобыль: Чернобыльінтерінформ, 1996. - 196 с.
 24. Кузьменко М.І., Романенко В.Д., Деревець В.В. та ін. Радіонукліди у водних екосистемах України. - К.: Чернобыльінтерінформ, 2001. - 318 с.
 25. Волкова О.М., Беляев В.В. Динаміка формування рівнів вмісту ^{137}Cs у гідробіонтах водойм України // Вісник Запорізь. нац. ун-ту: Зб. наук. ст. Біологічні науки. - 2007. - № 1. - С. 21 - 28.
 26. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники: Учеб. пособие для вузов. - 2-е изд., переработ. и доп. - М.: Радио и связь, 1985. - 488 с.
 27. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника: Учебник для вузов / Под ред. В. А. Лабунцова. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 320 с.

ДИНАМІКА КОЕФІЦІЄНТА НАКОПИЧЕННЯ ^{137}Cs У РИБ І–ІІ ТРОФІЧНИХ РІВНІВ ПРИ ЗМІНІ КОНЦЕНТРАЦІЇ РАДІОНУКЛІДА У ВОДІ ПРІСНОВОДНИХ ВОДОЙМ

В. В. Беляєв, О. М. Волкова

Методами математичного моделювання вивчено поведінку величини коефіцієнта накопичення ^{137}Cs у нехижких видів рыб при тимчасовому збільшенні концентрації радіонукліда у воді прісноводних водойм. Визначено вірогідність розбіжності величин миттєвих та рівноважних коефіцієнтів накопичення при одноразовому підвищенні концентрації ^{137}Cs у воді.

Ключові слова: риби, коефіцієнт накопичення, ^{137}Cs .

DYNAMICS OF FACTOR OF ^{137}Cs ACCUMULATION BY FISHES OF I–II TROPHIC LEVELS IN CASE OF RADIONUCLIDE CONCENTRATION VARIATION IN WATER OF FRESHWATER BODIES

V. V. Belyaev, E. N. Volkova

Behaviour value of factor of accumulation ^{137}Cs by non-predator species of fishes in case temporal increase of concentration of radionuclide in water of freshwater bodies was explored by the methods of mathematical modeling. It has been stated that probability of difference between instantaneous and equilibrium values of factor of accumulation in case of single increase concentration of ^{137}Cs in water.

Keywords: fishes, factor of accumulation, ^{137}Cs .

Поступила в редакцію 24.03.09,
после доработки – 02.07.09.