

УДК 546.32:577.34:597

В. В. Беляев – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела пресноводной радиоэкологии Института гидробиологии НАН Украины;

Е. Н. Волкова – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела пресноводной радиоэкологии Института гидробиологии НАН Украины;

А. В. Трапезников – доктор биологических наук, заведующий отделом континентальной радиоэкологии Института экологии растений и животных Уральского отделения РАН;

В. Н. Трапезникова – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела континентальной радиоэкологии Института экологии растений и животных Уральского отделения РАН

Механизмы формирования сезонных вариаций содержания ^{137}Cs в организме пресноводных рыб

Работа выполнена в отделе пресноводной радиоэкологии ИГ НАН Украины

Актуальность работы обусловлена тем, что до настоящего времени не определено, в какой период года удельная активность ^{137}Cs в рыбах достигает наибольших величин. Методами математического моделирования проанализированы механизмы формирования сезонных колебаний содержания ^{137}Cs в организме пресноводных рыб. Показано, что содержание ^{137}Cs может достигать максимальных величин в любой период года. Период максимального содержания ^{137}Cs в рыбах разных видов зависит от интенсивности питания рыб и содержания ^{137}Cs в кормовых объектах.

Ключевые слова: рыбы, пресноводные водоемы, ^{137}Cs , моделирование

Беляев В. В., Волкова О. М., Трапезников О. В., Трапезникова В. М. Механізми формування сезонних варіацій вмісту ^{137}Cs в організмі прісноводних риб. Актуальність роботи зумовлена тим, що на сьогодні не визначений період року, в який питома активність ^{137}Cs у рибях досягає максимальних значень. Методами математичного моделювання проаналізовано механізми формування сезонних варіацій вмісту ^{137}Cs в організмі прісноводних риб. Показано, що вміст ^{137}Cs може досягати максимальних величин у будь-який період року. Період максимального вмісту ^{137}Cs у рибях різних видів залежить від інтенсивності їхнього живлення та вмісту ^{137}Cs у кормових об'єктах.

Ключові слова: риби, прісноводні водойми, ^{137}Cs , моделювання.

Belyaev V. V., Volkova E. N., Trapeznikov A. V., Trapeznikova V. N. The Mechanisms of Formation of the Seasonal Variations of ^{137}Cs Content in the Organisms of Freshwater Fish. Relevance of the work due to the fact that up to now period of year, when specific activity of ^{137}Cs in fish reaches its maximum is not defined. Using methods of mathematical modeling formation mechanisms of seasonal variations of ^{137}Cs in the organism of freshwater fish was analysed. It is shown that the concentration of ^{137}Cs can reach maximum values at any time during the year. The period of maximum of ^{137}Cs content in fish of different species depends on the intensity of fish nutrition and ^{137}Cs content in food objects.

Key words: fishes, freshwater reservoirs, ^{137}Cs , modeling.

Постановка научной проблемы и ее значение. Жизнедеятельность гидробионтов в значительной степени зависит от сезонных изменений температуры воды в водоемах, интенсивности солнечного освещения, минерализации воды и других факторов среды. Такие изменения наблюдаются во всех температурных областях от тропиков до полюсов, но контрастнее выражены в умеренных и приполярных климатических зонах. В континентальных водоемах северного полушария в северном направлении увеличивается амплитуда изменений температуры воды и длительности периода ледостава, и многие изменения в жизнедеятельности организмов совпадают с внешними, геофизическими циклами. Именно с сезонной периодичностью связаны циклы развития гидробионтов [6; 10]. Интенсивность поглощения гидробионтами минеральных веществ, в том числе и радионуклидов,

зависит от скорости протекания метаболических процессов, поэтому важно определить, каковы особенности сезонных вариаций накопления радионуклидов гидробионтами и чем они обусловлены.

Анализ последних исследований по этой проблеме. В научной литературе приведены результаты многочисленных исследований динамики накопления радионуклидов пресноводными рыбами, однако до настоящего времени специалисты не пришли к единому мнению относительно сезона максимальных уровней содержания радионуклидов в организме этих гидробионтов. Результаты исследований, полученные для рыб разного типа питания, возраста, отличающихся скоростью метаболизма, миграционным поведением и обитающих в водоемах разных климатических зон кардинально отличаются [2; 7].

Формулировка цели и задач статьи. К настоящему времени возникла некоторая неопределенность данных относительно сезонной динамики накопления радионуклидов рыбами разного типа питания. Поэтому **цель** нашей работы – методами математического моделирования исследовать особенности сезонной динамики накопления ^{137}Cs рыбами.

Материалы и методы. Для моделирования уровней накопления ^{137}Cs в организме пресноводных рыб использовалась следующая система уравнений:

$$dA_{fi}(t)/dt = V(t)A_i - p_i A_{fi}(t); A_f(t) = \sum A_{fi}(t) \quad i=1, n \quad (1)$$

где $A_f(t)$ – радиоактивность организма; $A_{fi}(t)$ – активность радионуклида в i -той камере (активность компоненты); $V(t)$ – поступление (поток) радионуклида в организм за время dt ; A_i – парциальное поступление радионуклида в i -тую камеру; p_i – парциальные скорости выведения радионуклида из A_{fi} (i -той камеры), причем $p_i = -\ln 2/T_i$, T_i – парциальный период полувыведения радионуклида; n – количество камер. Размерность величин выбиралась так, чтобы величины выражений $p_i \cdot t$ или t/T_i были безразмерными, а размерности выражений $dA_{fi}(t)/dt$, $V(t)A_i$ и $p_i A_{fi}(t)$ – совпадали.

Решение системы уравнений (1) с начальными условиями ($t_0=0$, A_0), описывающее радиоактивность организма, имеет вид:

$$A_f(t) = \sum A_i \exp(-\int p_i dt) (A_0 + \int V(t) \exp(\int p_i dt) dt) \quad (2)$$

(интегрирование от 0 до t).

Содержание ^{137}Cs в рыбах моделировали пошагово на основании уравнения (2), принимая A_0 равным активности организма на предыдущем шаге, т. е.:

$$A_0 = A_f(t-\Delta t),$$

где Δt – шаг моделирования.

При моделировании было принято, что $T_3 = 10T_2 = 100 T_1$; $A_1 \approx A_2 \approx 0,2$, $A_3 \approx 0,6$. Выведение радионуклида из камер с периодами T_1 и T_2 называют быстрыми компонентами выведения, с периодом T_3 – медленной компонентой выведения. Величину радиоактивности рыб нормировали на количество ^{137}Cs , поступившего в организм за год. Предполагали, что поступление радионуклида в организм прямопропорционально произведению интенсивности питания на удельное содержание радионуклида в корме. В общем случае предполагалось, если отдельно не оговорено, что удельное содержание ^{137}Cs в корме рыб на протяжении года не изменяется.

Изложение основного материала и обоснование полученных результатов исследований. Рассмотрим возможность влияния внешнего фактора – сезонных изменений радиоактивности корма на формирование сезонных вариаций содержания ^{137}Cs в рыбах. Предположим, что интенсивность питания рыб на протяжении года не изменяется, а радиоактивность корма прямопропорциональна активности ^{137}Cs в водных массах (последнее справедливо только для мирных рыб). При этом в период открытой воды $T_3 = 100$ суток, в период ледостава, т. е. с 1 декабря до 28 февраля $T_3 = 200$ суток. Динамика концентрации ^{137}Cs в водных массах выбрана на основании исследований, проведенных на водоеме-охладителе ЧАЭС (ВО ЧАЭС) [9]. Расчеты показывают, что среднее содержание ^{137}Cs в рыбах составит $0,30 \pm 0,05$ годового поступления, а размах колебаний – 15 % от среднегодовой величины содержания радионуклида в организме. Минимальное содержание ^{137}Cs в организме рыб будет наблюдаться в конце мая, максимальное – в январе (рис. 1). По времени максимальное содержание ^{137}Cs в рыбах практически совпадает с его минимальной концентрацией в воде. Это можно объяснить тем, что за счет уменьшения скорости метаболизма, что заложено в модели, и на фоне уменьшения активности корма, процессы накопления ^{137}Cs с сентября по январь преобладают над процессами его выведения.

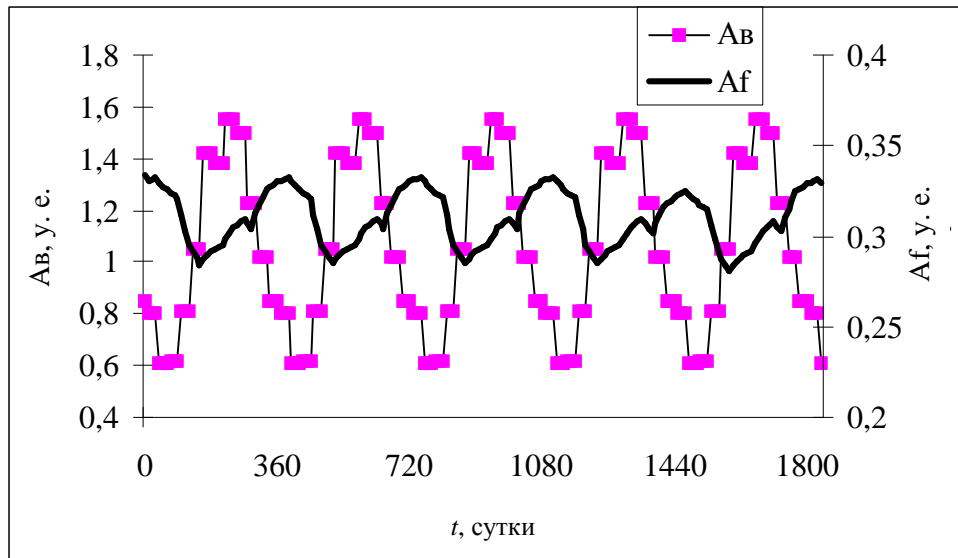


Рис. 1. Динаміка вмісту ^{137}Cs в рибах при прямопропорційній залежності його поступлення в організм від концентрації в воді: A_f – вміст ^{137}Cs в рибах (1 у. е. – годовое поступление ^{137}Cs); A_v – концентрація ^{137}Cs в воді (1 у. е. – середнегодовая концентрація ^{137}Cs в воді, по даним [9])

Тепер розглянемо сезонну динаміку ^{137}Cs в рибах для випадку відсутності харчування взимку і рівномірного надходження корму в решту часу. Припускали, що в період відкритої води $V(t)$ постійно, $T_3 = 100$ суток, в період льодостави $V(t) = 0$, $T_3 = 200$ суток. Тоді максимальна активність ^{137}Cs в організмі становитиме 0,305; мінімальна – 0,218 від величини годового надходження; середня величина активності 0,28; середньоквадратичне відхилення (STD) – 0,02. Розмах коливань активності ^{137}Cs становитиме 0,31 від середнегодовой величини. Максимальне вміст ^{137}Cs в організмі риб буде спостерігатися в кінці сезону нагулу; мінімальне – в момент часу, передуючого сезону нагулу.

В природних водоймах картина харчування риб декількома складніше. На основі даних про температурний режим водойм і про те, що при зменшенні температури на 10°C швидкість травлення риб уповільнюється в 2 – 3 рази [5], ми зробили наступні припущення: в період льодостави (1 грудня – 28 лютого) риба не їсть; в період з 1 травня до 19 вересня інтенсивність харчування в 3 рази вище, ніж в періоди з 1 березня до 31 березня і з 20 жовтня до 30 листопада; в періоди з 1 до 30 квітня і з 20 вересня до 19 жовтня інтенсивність харчування в 2 рази вище, ніж в періоди з 1 березня до 31 березня і з 20 жовтня до 30 листопада.

Таким чином, урахування реальних сезонних змін режиму харчування риб показує, що сезонний розмах коливань вмісту радіонукліда в рибах становить до 40 % від усередненої за рік величини. В цьому випадку збільшується і середня за рік величина вмісту ^{137}Cs в рибах, що становить 0,302 (STD = 0,04) годового надходження радіонукліда, що майже збігається з максимальним значенням для попереднього сценарію (0,305). В цьому випадку максимальне значення радіоактивності риб буде спостерігатися в період завершення найбільш інтенсивного харчування, т. е. в кінці літа – на початку осені. Отже, навіть при продовженні харчування і, відповідно, надходженні радіонукліда в організм, з середини вересня і до початку зими процеси виведення переважають над процесами надходження.

Проведений нами аналіз впливу особливостей харчування мирних риб на сезонні варіації вмісту ^{137}Cs в організмі показує, що важливе значення має не тільки сам факт вживання або не вживання їжі в певні періоди їхнього життєвого циклу, але й інтенсивність цього процесу. Чисельні експерименти показують, що зменшення інтенсивності харчування риб в осінній період призводить до зміщення максимуму вмісту радіонукліда в організмі на 2,5 місяця.

Необхідно зазначити, що внесок швидких компонентів виведення не перевищує декількох відсотків від загального вмісту радіонукліда в рибах, а розмах сезонних коливань досягає половини мінімального значення активності радіонукліда в організмі.

Для того, чтобы достоверно зафиксировать 15 % размах сезонных колебаний амплитуды содержания ^{137}Cs в рыбах при $Q = 5\%$ и $STD = 20\%$, выборки рыб должны быть не менее, чем по 12 экземпляров, при $STD = 25\%$ не менее чем, по 18. При этом рыбу необходимо отлавливать в периоды времени, соответствующие моментам минимального и максимального содержания ^{137}Cs в организме.

Исследования динамики удельной активности ^{137}Cs в ихтиофауне ВО ЧАЭС [1] подтверждают результаты, полученные в численном эксперименте (рис. 2). Максимальные значения удельной активности ^{137}Cs в организме густеры наблюдались в конце августа – середине сентября, минимальные – с середины октября до середины марта. Размах колебаний удельного содержания радионуклида составлял до 50 % от минимальной величины.

Сезонная динамика накопления ^{137}Cs в организме хищных рыб должна зависеть от интенсивности питания и содержания радионуклида в рыбах низших трофических уровней, являющихся объектами питания хищников-ихтиофагов. Рассмотрим сезонные изменения радиоактивности хищных рыб на примере щуки. Этот вид относится к бореальному фаунистическому комплексу и питается круглый год [4; 5; 7]. Необходимо отметить некоторые особенности пищевого поведения этого вида, зависящие от условий обитания. Так, в Киевском водохранилище доля питающихся особей (точнее, рыб с непустыми желудками) составляла 33–75 % от общего количества исследованных особей, при этом максимальное количество питающихся рыб встречалось зимой (75 %). В период с весны до осени количество особей с не пустыми желудками составляло 33–39 %. В р. Тетерев наблюдали более сглаженную картину питания – минимальное количество не питающихся рыб встречалось весной (42 %), летом и зимой количество не питающихся особей было примерно одинаковым [7].

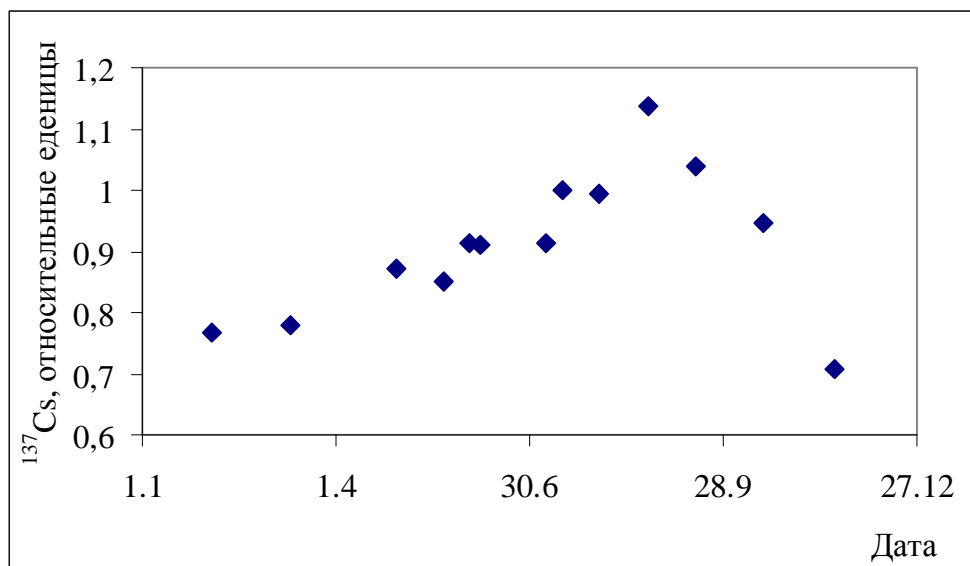


Рис. 2. Сезонная динамика удельной активности ^{137}Cs в организме густеры водоема-охладителя ЧАЭС, 2001 – 2003 гг.

С учетом данных [3], при моделировании сезонных изменений содержания ^{137}Cs в щуке было принято, что с 1 апреля до 31 октября период полувыведения медленной компоненты составляет 200 суток, а с 1 ноября до 31 марта, учитывая замедление метаболизма, – 300 суток.

Понятно, что при поступлении радиоактивных изотопов алиментарным путем количество радионуклида, поступившего в организм рыбы, прямопропорционально объему потребленного корма. Поэтому мы приняли, что поток ^{137}Cs в организм щуки прямопропорционален ее суточному рациону. В этом случае коэффициент пропорциональности тождественен удельной активности радионуклида в объектах питания щуки. В качестве параметра модели был принят тщательно исследованный суточный рацион щуки в дельте Волги по данным [5]. Температура воды в этом регионе с начала декабря до середины апреля не превышает $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, что сопоставимо с термическим режимом верхних Днепровских водохранилищ. Период наиболее интенсивного питания щуки приходится на май (суточный рацион до 3,9 % от массы тела) [5], а именно в этот период в регионе происходят

нерестовые миграции рыб – кормовых объектов щуки [8]. Еще один период увеличения интенсивности питания щуки, зарегистрированный в январе, обусловлен появлением первых подледных нерестовых косяков мирных видов рыб.

Проведенные нами расчеты содержания ^{137}Cs в организме щуки при условии постоянной радиоактивности объектов ее питания на протяжении года выявили три максимума удельной активности радионуклида. Первый приходится на середину зимы, второй отмечен в конце периода весеннего жора, третий – в конце вегетационного периода. Максимальный размах амплитуды сезонных вариаций содержания ^{137}Cs в щуке составляет 17 % минимальной величины активности радионуклида в организме (рис. 3).

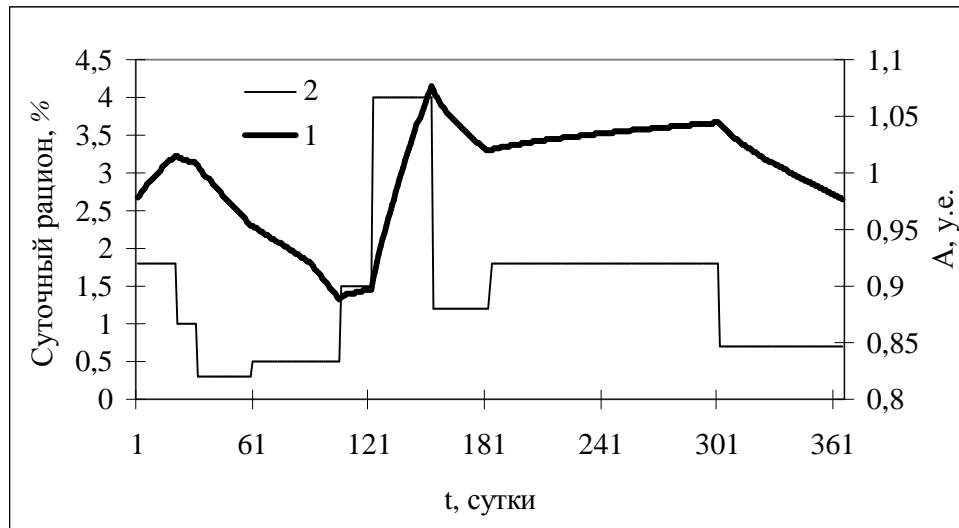


Рис. 3. Сезонная динамика содержания ^{137}Cs в щуке, 1 – содержание радионуклида в организме, 2 – суточный рацион по данным [5] (1 у.е – среднегодовая активность радионуклида в организме)

Как было показано ранее, у мирных рыб, входящих в спектр питания щуки, проявляется сезонная динамика содержания ^{137}Cs в организме. Поэтому мы рассчитали содержание ^{137}Cs в щуке с учетом сезонной динамики активности радионуклида в мирных рыбах – объектах питания щуки.

Для исследования межсезонных вариаций содержания ^{137}Cs в организме щуки мы использовали данные о сезонной динамике этого радионуклида в организме густеры из ВО ЧАЭС (см. рис. 2). Несовпадение времени наиболее интенсивного питания щуки и максимального содержания радионуклида в объектах ее питания приводит к уменьшению размаха сезонных изменений активности радионуклида в организме щуки и уменьшению количества максимумов накопления (рис. 4). Видно, что по сравнению с предыдущим сценарием (см. рис. 3), размах сезонных колебаний активности радионуклида в щуке уменьшился почти в четыре раза и составил 4,7 % от минимальной за год величины. Расчет показывает, что максимальное содержание ^{137}Cs в организме щуки должно наблюдаться в конце марта, а минимальное – в июле.

Анализ результатов моделирования, объясняющих механизмы формирования сезонных вариаций содержания ^{137}Cs в рыбах, позволяет пересмотреть некоторые сделанные ранее выводы. Так, в 1996 г. при постоянной концентрации ^{137}Cs в воде Киевского водохранилища, отмечено вторичное загрязнение рыб ^{137}Cs . В качестве объяснения этого факта была выдвинута гипотеза об изменении соотношения физико-химических форм радионуклидов в водных массах, поступавших в Киевское водохранилище с водосборных территорий [7]. Проведенное моделирование позволяет объяснить это с других позиций. Зима 1995–1996 гг. была аномально теплой, и, согласно данным [7], активно питались не только хищники, но и бентофаги. В таком случае, как было показано выше, процессы накопления ^{137}Cs у рыб любого вида питания преобладают над процессами выведения. Именно это в 1996 г. могло послужить причиной увеличения удельной активности радионуклида в рыбах Киевского водохранилища.



Рис. 4. Сезонная динамика ^{137}Cs в щуке: 1 – содержание ^{137}Cs в объекте питания щуки (A_1), 2 – содержание ^{137}Cs в щуке (A_2), 1 у. е. – среднегодовая активность ^{137}Cs в щуке или объектах ее питания

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Проведенные нами численные эксперименты показывают, что, в зависимости от режима питания и содержания ^{137}Cs в кормовых объектах, экстремальные значения амплитуды его сезонного содержания в организмах пресноводных рыб разных видов и в разных водоемах могут наблюдаться в любое время года. В некоторых случаях сезонные изменения содержания ^{137}Cs в организмах рыб и их кормовых объектах могут быть в противофазе. Поэтому при прогнозировании содержания ^{137}Cs в пресноводных рыбах необходимо учитывать сезонные вариации содержания этого радионуклида, которые могут составлять до 50 % среднегодовой величины.

Список использованной литературы

1. До питання про оцінку динаміки вмісту радіонуклідів у прісноводних рибах після аварії на ЧАЕС / О. І. Насвіт, В. В. Беляєв, О. О. Заліський, Л. П. Юрчук // Радіобіологічні ефекти: ризики, мінімізація, прогноз : матеріали Міжнар. конф., Київ, 22–24 берез. 2005 р. – К. : [б. в.], 2005. – С.127–138.
2. Животный мир в зоне аварии Чернобыльской АЭС / под ред. Л. М. Сушени, М. М. Пикулика, А. Е. Пленина. – Минск : Наука і тэхніка, 1995. – 263 с.
3. Никольский Г. В. Частная ихтиология / Г. В. Никольский. – М. : Высш. шк., 1971. – 471 с.
4. Попова О. А. Роль хищных рыб в экосистемах / О. А. Попова // Изменчивость рыб пресноводных экосистем. – М. : Наука, 1979. – С. 13–47.
5. Романенко В. Д. Основы гидроэкологии / В. Д. Романенко. – Киев : Генеза, 2005. – 664 с.
6. Рябов И. Н. Радиэкология рыб водоемов в зоне влияния аварии на Чернобыльской АЭС / И. Н. Рябов. – М. : Т-во науч. изд. КМК. – 2004. – 215 с.
7. Сабанеев Л. П. Жизнь и ловля пресноводных рыб / Л. П. Сабанеев. – К. : Урожай, 1994. – 608 с.
8. Сезонна поведінка радіонуклідів у воді водойм-охолоджувача Чорнобильської АЕС / О. Насвіт, В. Деревець, С. Кіреєв, Ю. Ткаченко // Радіоекологія Чорнобильської зони : тези доп. Міжн. наук. семінару; 27–28 верес. 2002 р., Славутич. – Славутич : Міжнар. радіоекол. лаб. – С. 134–135.
9. Скадовский С. Н. Экологическая физиология водных организмов / С. Н. Скадовский. – М. : Сов. наука, 1955. – 338 с.
10. Насвит О. И. Определение кинетических параметров процесса накопления радионуклидов компонентами экосистем по равновесным значениям коэффициентов концентрирования / О. И. Насвит, Н. И. Буянов, М. И. Кузьменко // Гидробиол. журн. – 1986. – Т. 22, № 5. – С. 97–100.

Статья поступила в редколлегию
21.01.2013 р.