

УДК 546.32:577.34:597

В. В. Беляев, Е. Н. Волкова

**МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ СЕЗОННЫХ
ВАРИАЦИЙ СОДЕРЖАНИЯ ^{90}Sr И ^{137}Cs В
ПРЕСНОВОДНЫХ РЫБАХ**

Методами математического моделирования изучены механизмы формирования сезонных изменений содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в организме пресноводных рыб. Максимальный размах сезонных вариаций содержания ^{90}Sr в рыбах составляет 17% среднегодовой величины, ^{137}Cs — 50%.

Ключевые слова: пресноводные рыбы, ^{90}Sr , ^{137}Cs , сезонные вариации, математическое моделирование.

Известно, что интенсивность поглощения гидробионтами минеральных веществ, в том числе и радионуклидов, меняется с изменением скорости метаболических процессов. Последняя у гидробионтов напрямую связана с внешними геофизическими циклами, что приводит к сезонным изменениям содержания радионуклидов в организме. Кроме того, отмечены значительные (до 1000%) сезонные вариации содержания радионуклидов в абиотических компонентах водных экосистем, что также влияет на накопление радиоактивных веществ живыми организмами [6, 8, 11, 13, 16, 17, 20].

В научной литературе приведены результаты многочисленных исследований динамики содержания радионуклидов в гидробионтах, однако до настоящего времени специалисты не пришли к единому мнению относительно сезона максимального уровня радионуклидного загрязнения рыб — высокоорганизованных организмов с многолетним жизненным циклом, сложным поведением и широким спектром питания. Поэтому результаты исследований, полученные для рыб разного типа питания, возраста, с разной скоростью метаболизма, миграционным поведением и обитающих в водоёмах разных климатических зон, кардинально различаются [4, 5, 14, 18].

Таким образом, учитывая возникшую к настоящему времени неопределённость данных относительно сезонной динамики накопления радионуклидов рыбами, мы пришли к выводу о необходимости исследовать временные и амплитудные особенности внутригодовой динамики содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в их организме методами математического моделирования.

Методика исследований. В живых организмах метаболизм химических элементов, в том числе и их радиоактивных изотопов, значительно различа-

© В. В. Беляев, Е. Н. Волкова, 2013

ется, поэтому в процессе моделирования рассчитывают содержание каждого радионуклида отдельно. В наиболее общем случае содержание радионуклида в организме в приближении многокамерной модели описывается системой дифференциальных уравнений первого порядка с учётом взаимосвязи между камерами. Результаты многочисленных исследований [1—3, 7] показывают, что динамика содержания радионуклида в организме гидробионта хорошо описывается 2 (3)-х камерной моделью с учётом только уравнения баланса радионуклидов, в которой взаимодействием между камерами можно пренебречь. Поэтому для описания динамики содержания радионуклида в рыбах мы выбрали именно такую модель. Аналитическое решение системы уравнений данной модели существует только для ограниченного количества случаев.

Для численного описания динамики содержания радионуклида в организме использовали следующую систему выражений:

$$\begin{aligned} A_f(t) &= \sum A_{fi}(t), \quad i = 1, 3, \\ A_{fi}(t) &= VA_i \Delta t + A_{fi}(t - \Delta t) \exp(-p_i \Delta t), \end{aligned} \quad (1)$$

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 i -той камеры (A_{fi}), при этом $p_i = -\ln 2/T_i$; T_i — парциальный период полувыведения радионуклида; принимаем, что $T_3 > T_2 > T_1$.

Количество радионуклида, содержащегося в камере, называют также компонентой выведения. В зависимости от скорости выведения радионуклида из организма она может быть быстрой или медленной.

Система уравнений (1) может применяться без ограничений при условии, что период полувыведения наиболее быстрой компоненты много больше, чем шаг моделирования ($T_1 \gg \Delta t$). Если шаг моделирования сопоставим с периодом полувыведения наиболее быстрой компоненты, то система уравнений (1) может применяться при одновременном выполнении следующих условий: 1) интервал, охваченный моделированием, много больше шага моделирования ($t \gg \Delta t$); 2) произведение парциальных вклада и периода полувыведения медленной компоненты много больше произведения парциальных вклада и периода полувыведения более быстрой компоненты ($A_3 \cdot T_3 \gg A_i \cdot T_i$, $i = 1, 2$). Для удобства представления результатов содержание радионуклида в рыбе нормировали на количество ^{90}Sr или ^{137}Cs , поступившее в организм за год.

Результаты исследований и их обсуждение

Параметры модели содержания ^{90}Sr в организме пресноводных рыб определены на основании экспериментальных исследований [9]. Было установлено, что у них наблюдаются две компоненты выведения ^{90}Sr с парамет-

рами: $A_2 \approx 0,15$ и $A_3 \approx 0,85$, $T_2 \approx 90$ и $T_3 \approx 900$ сут. Близкие результаты получены для другого радиоактивного изотопа стронция — ^{89}Sr [2]. Было принято, что $A_1, T_1 = 0$.

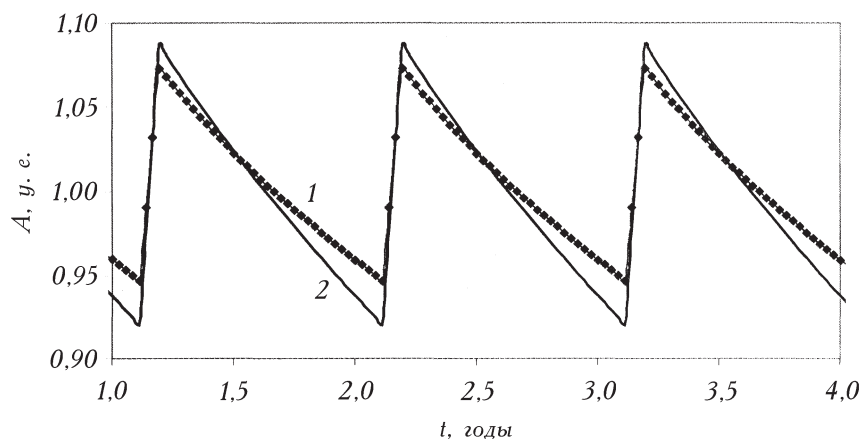
Пресноводные рыбы накапливают ^{90}Sr из водных масс, поэтому логично предположить, что и сезонная динамика содержания радионуклида в рыбах должна отображать сезонные изменения его концентрации в водных массах. Расчёты показывают, что при однократном повышении концентрации ^{90}Sr в водных массах на период 30 сут размах колебаний его активности в рыбах будет в 50 раз меньше, чем в воде.

При ежегодных увеличениях концентрации ^{90}Sr в воде в десять раз и длительности периода повышения 30 сут его максимальное содержание в рыбах будет отличаться от среднегодового не более чем на 7%, а размах его колебаний не превысит 11%. При этом амплитуда колебаний содержания радионуклида в рыбах приблизительно в 90 раз меньше, чем в воде. Если же концентрация радионуклида в воде ежегодно на такой же период будет увеличиваться в 20 раз, его максимальное содержание в рыбах будет отличаться от среднегодового не более чем на 9%, а размах колебаний не превысит 17% (рис. 1). Амплитуды колебаний содержания ^{90}Sr различаются в 117 раз.

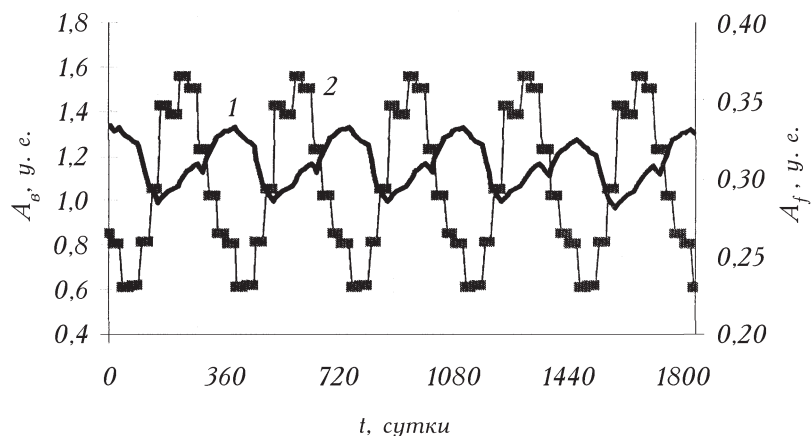
Пресноводные рыбы усваивают ^{137}Cs в основном алиментарным путем, скорость его метаболизма в организме в несколько раз выше, чем ^{90}Sr . При исследовании механизмов формирования сезонных изменений активности ^{137}Cs в рыбах предположили, что его поступление в организм прямо пропорционально произведению интенсивности питания и удельного содержания радионуклида в корме.

Сначала исследуем возможность влияния внешнего фактора — сезонных изменений радиоактивности корма на формирование сезонных вариаций содержания ^{137}Cs в рыбах. Предположим, что интенсивность питания на протяжении года не меняется, а радиоактивность корма прямо пропорциональна активности ^{137}Cs в водных массах. Примем, что $T_3 = 10T_2 = 100T_1$; $A_1 \approx A_2 \approx 0,2$, $A_3 \approx 0,6$. При этом в период открытой воды $T_3 = 100$ сут, в период ледостава, т. е. с 1 декабря по 28 февраля, $T_3 = 200$ сут. Изменения концентрации ^{137}Cs в водных массах установлены на основании исследований, проведённых на водоёме-охладителе Чернобыльской АЭС (ВО ЧАЭС) [11]. Необходимо отметить, что условие пропорциональности содержания радионуклида в водных массах и корме справедливо только для мирных видов рыб.

Расчёты показывают, что среднее содержание ^{137}Cs в рыбах составляет $31,0 \pm 1,5\%$ годового поступления, а размах колебаний — 15% среднегодового его содержания. Минимальная концентрация ^{137}Cs в организме рыб будет отмечаться в конце мая, максимальная — в январе (рис. 2), что практически совпадает по времени с его минимальной концентрацией в воде. Это можно объяснить тем, что за счёт снижения скорости метаболизма (это заложено в модели) и на фоне уменьшения радиоактивности корма с сентября по январь процессы накопления радионуклида преобладают над процессами выведения.



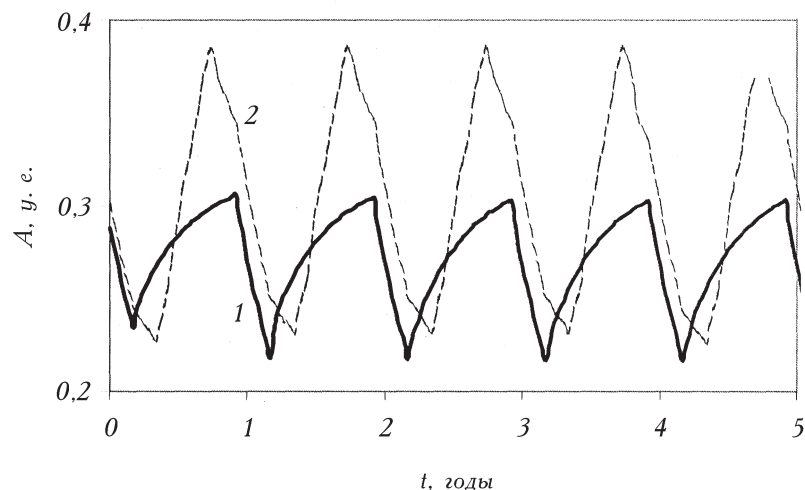
1. Динамика содержания ^{90}Sr в рыбах при кратковременном ежегодном увеличении концентрации радионуклида в воде в 10 (1) и 20 раз (2).



2. Динамика содержания ^{137}Cs в рыбах при прямо пропорциональной зависимости поступления радионуклида в организм от его концентрации в водных массах: $I(A_f)$ — содержание ^{137}Cs в рыбах (1 у. е. — годовое поступление радионуклида); $2(A_v)$ — концентрация ^{137}Cs в водных массах (1 у. е. — среднегодовая концентрация радионуклида в водных массах [11]).

Рассмотрим сезонную динамику содержания ^{137}Cs в организме рыб при отсутствии питания зимой и равномерного поступления корма в остальное время. При расчётах предполагали, что в период открытой воды поступление радионуклида ($V(t)$) постоянно, $T_3 = 100$ сут, в период ледостава, с 1 декабря по 28 февраля, $V(t) = 0$, $T_3 = 200$ сут, $T_3 = 10T_2 = 100T_1$, $A_1 \approx A_2 \approx 0,2$, $A_3 \approx 0,6$.

Для такого режима питания и, соответственно, поступления ^{137}Cs в рыбу его максимальная активность в организме составит 30,5, минимальная — 21,8% величины годового поступления, средняя активность — 28,0%, средне-



3. Динамика содержания ^{137}Cs в рыбах при его периодическом поступлении с кормом: 1 — в период нагула поступление равномерное; 2 — в период нагула поступление неравномерное (1 у. е. — годовое поступление ^{137}Cs).

квадратичное отклонение (*STD*) — 2,0%. Размах колебаний активности радионуклида в организме будет равен 31% средней величины. Его максимальное содержание в организме рыб приурочено к концу сезона нагула, а минимальное — ко времени, ему предшествующему (рис. 3, 1).

Необходимо учитывать, что в естественных водоёмах картина питания рыб значительно сложнее. Поэтому на основании данных о температурном режиме водоёмов и принимая во внимание, что при уменьшении температуры на 10°C скорость пищеварения рыб замедляется в 2—3 раза [15], мы сделали следующие предположения об интенсивности питания и, соответственно, поступлении ^{137}Cs в организм (таблица).

Сравнение теоретических предположений с расчётами, учитывающими реальные сезонные изменения режима питания рыб, показывает, что сезонный размах колебаний содержания ^{137}Cs в их организме увеличивается до 40% усреднённой за год величины. При этом последняя возрастёт до 30,2% (*STD* = 4,0%) его годового поступления, а максимальное значение радиоактивности рыб регистрируется в период завершения наиболее интенсивного питания, т. е. в конце лета — начале осени (см. рис. 3, 2). Следовательно, даже при продолжении питания рыб и, соответственно, поступлении радионуклида в организм с середины сентября процессы выведения преобладают над процессами поступления. Проведённый нами анализ влияния особенностей питания мирных рыб на протяжении года на сезонные вариации содержания ^{137}Cs в организме показывает, что существенное значение имеет не только сам факт потребления или непотребления пищи в определённые периоды жизненного цикла, но и интенсивность этого процесса.

Интенсивность поступления ^{137}Cs в организм рыб

Периоды	$V(t)$, у. е.
1 декабря — 28 февраля	0
1—31 марта, 20 октября — 30 ноября	1
1—30 апреля, 20 сентября — 19 октября	2
1 мая — 19 сентября	3

Примечание. $V(t)$ — поступление радионуклида в организм за время dt (см. формулу (1)).

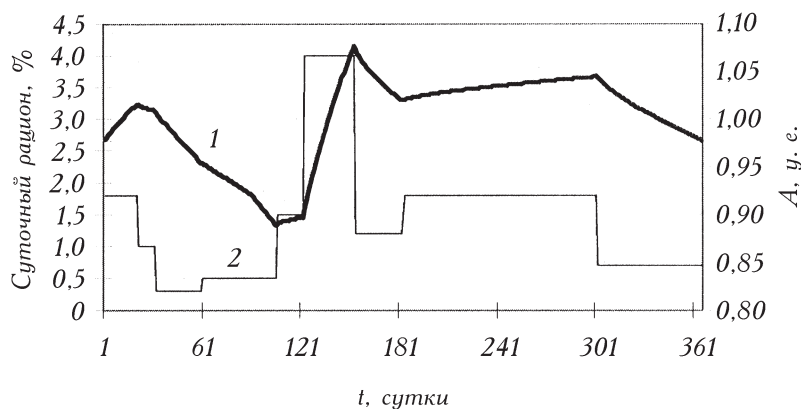
Необходимо отметить, что вклад быстрых компонент выведения ^{137}Cs не превышает нескольких процентов его общего содержания в организме, а размах сезонных колебаний достигает половины минимального значения активности.

В пределах статистической ошибки данные по внутригодовой динамике удельной активности ^{137}Cs в рыбах ВО ЧАЭС [12] совпадают с данными, полученными в численном эксперименте. Так, максимальные значения этого показателя в организме густеры отмечены в конце августа — середине сентября, минимальные — с середины октября до середины марта. Размах колебаний составлял до 50% минимальной величины.

Рыбы-ихтиофаги усваивают ^{137}Cs путем потребления рыб низших трофических уровней, поэтому накопление ими ^{137}Cs непосредственно не зависит от концентрации радионуклида в водных массах. Рассмотрим сезонные изменения радиоактивности хищных рыб на примере щуки. Этот вид относится к бореальному фаунистическому комплексу и питается круглый год [13—15]. Пищевое поведение щук различается даже в близко расположенных связанных между собой водоёмах [18].

При моделировании сезонных изменений содержания ^{137}Cs в организме щуки были приняты следующие параметры: $A_1 \approx A_2 \approx 0,2$, $A_3 \approx 0,6$; $T_3 = 10T_2 = 100T_1$. Период полувыведения медленной компоненты выбран на основании данных, полученных в 1982—1985 гг. в экспериментальных работах на ВО ЧАЭС [10]. В связи с зимним замедлением процессов метаболизма считали, что с 1 ноября по 31 марта период полувыведения медленной компоненты ^{137}Cs из организма щуки равен 300 сут, а с 1 апреля по 31 октября — 200 и что поток ^{137}Cs в организм щуки прямо пропорционален её суточному рациону. Коэффициент пропорциональности тождествен удельной активности радионуклида в объектах её питания. В качестве параметра модели использовали суточный рацион щуки [15]. Период наиболее интенсивного питания приходится на май (суточный рацион достигает 3,9% массы тела) [15], именно в этот период происходят нерестовые миграции рыб — её кормовых объектов [19]. Ещё один период увеличения интенсивности питания щуки, зарегистрированный в январе, обусловлен, по-видимому, появлением первых подлёдных нерестовых косяков мирных рыб.

Проведённые нами расчёты содержания ^{137}Cs в организме щуки при условии, что удельная активность объектов её питания на протяжении года не меняется, показывают наличие трёх максимумов его удельной активност

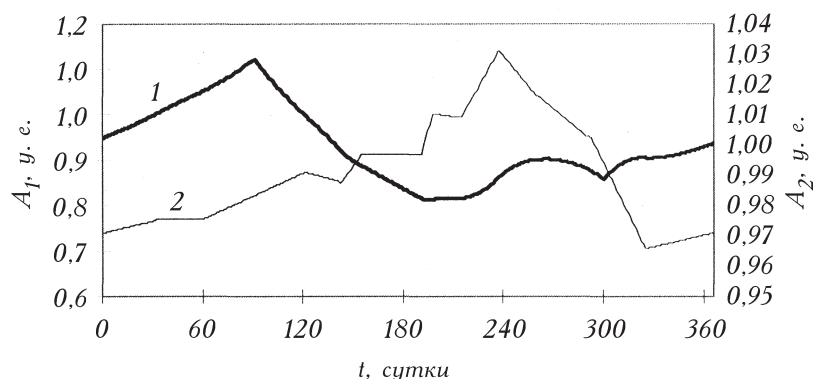


4. Сезонная динамика содержания ^{137}Cs в организме щуки (1); суточный рацион [15] (2) (1 у. е. — среднегодовая активность ^{137}Cs в организме).

сти. Первый приходится на середину зимы, второй отмечен в конце периода весеннего жора, третий — в конце вегетационного периода. Максимальный размах сезонных вариаций содержания ^{137}Cs в щуке составляет 17% минимальной величины его активности (рис. 4).

Как было показано ранее, у мирных рыб, входящих в спектр питания щуки, проявляется сезонная динамика содержания ^{137}Cs в организме. Поэтому был проведён расчёт содержания ^{137}Cs в щуке с учётом сезонной динамики его активности в организме мирных рыб — объектов её питания. В качестве параметра использовали данные о сезонной динамике этого радионуклида в организме густеры из ВО ЧАЭС. Несовпадение времени наиболее интенсивного питания щуки и максимального содержания радионуклида в объектах её питания приводит к уменьшению размаха сезонных изменений активности радионуклида в ней и снижению количества максимумов накопления (рис. 5). По сравнению с предыдущим сценарием (см. рис. 4), размах сезонных колебаний активности радионуклида уменьшился почти в четыре раза и составил 4,7% минимальной за год величины. Согласно расчётам максимальное содержание ^{137}Cs в организме щуки должно быть в конце марта, минимальное — в июле.

Проведённые нами численные эксперименты показывают, что в зависимости от режима питания и содержания радионуклидов в кормовых объектах экстремальные значения сезонного содержания ^{137}Cs в организме пресноводных рыб разных видов и в разных водоёмах могут регистрироваться в любое время года. В некоторых случаях сезонные изменения его содержания в пресноводных рыбах и их кормовых объектах могут быть в противофазе. Результаты расчётов, объясняющие механизмы сезонных вариаций содержания ^{137}Cs в организме пресноводных рыб, позволяют также пересмотреть некоторые сделанные ранее выводы. Так, в 1996 г. при постоянной концентрации радионуклида в водных массах Киевского водохранилища наблюдалось вторичное загрязнение рыб ^{137}Cs [18]. Было сделано предположение, что увеличение его содержания в рыбах обусловлено изменением соот-



5. Сезонная динамика содержания ^{137}Cs в организме щуки (A_2) (1) и в объекте её питания (A_1) (2) (1 у. е. — среднегодовая активность ^{137}Cs в щуке или объектах её питания).

ношения физико-химических форм радионуклидов в водных массах, поступавших в водохранилище. Однако, принимая во внимание результаты наших расчётов, такое явление можно объяснить по-другому. Согласно литературным данным [14, 18], зима 1995—1996 гг. была аномально тёплой и рыбы не прекращали питание в зимний период. При этом, как было показано выше, процессы накопления ^{137}Cs преобладают над процессами выведения, а для хищных видов ещё и возрастает радиоактивность кормовых объектов, что приводит к увеличению содержания радионуклида в организме.

Таким образом, величина размаха сезонных колебаний содержания ^{90}Sr в рыбах, полученная в численных экспериментах, составляет 10—17% его среднегодового содержания, а ^{137}Cs в мирных видах и ихтиофагах — соответственно 15—40 и 5 — 17%. Для того чтобы достоверно зарегистрировать наличие сезонных изменений содержания радионуклидов в рыбах, необходимо определить минимальное количество экземпляров в выборках. Для отобранных в естественных условиях выборок рыб *STD* удельной активности каждого радионуклида составляет, как правило, 20—30%. Если объёмы и *STD* выборок равны, а выборки отобраны в периоды экстремального содержания радионуклида в организме, то для достоверной регистрации 15%-ного отклонения, при $Q = 5\%$ (Q — процентная точка распределения Стьюдента) и *STD* = 20%, выборки должны быть не менее чем по 12, а при *STD* = 25% — по 18 экземпляров. Если отклонение будет составлять 40%, то при $Q = 5\%$ и *STD* = 20% объём выборок должен быть больше четырех, а при *STD* = 25% — больше пяти экземпляров. Отсутствие достоверных данных о сезонной динамике содержания радионуклидов в рыбах естественных водоёмов, на наш взгляд, обусловлено тем, что в большинстве исследований не выполняются условия отбора проб в периоды экстремальных значений, а объёмы выборок недостаточны.

Заключение

Результаты моделирования содержания радионуклидов в организме рыб показывают, что кратковременное увеличение (до 20 раз) концентрации ^{90}Sr в воде

не может привести к значительному возрастанию его удельной активности у рыб. Если концентрация ^{90}Sr в воде ежегодно будет увеличиваться в 20 раз на период до 30 сут, то размах колебаний его удельной активности не превысит 17% среднегодовой. Крайние значения амплитуды сезонного изменения содержания ^{137}Cs в пресноводных рыбах могут приходиться на любое время года, в зависимости от режимов питания и его содержания в кормовых объектах. В некоторых случаях сезонные изменения содержания ^{137}Cs в организме пресноводных рыб и их кормовых объектах находятся в противофазе. Их размах может достигать 50% среднегодового содержания радионуклида в организме. В естественных водоёмах сезонные изменения этого показателя в организме рыб могут маскироваться вариацией его содержания в выборке.

**

Методами математичного моделювання вивчено механізми формування сезонних змін вмісту ^{90}Sr та ^{137}Cs в організмі прісноводних риб. Максимальний розмах сезонних варіацій вмісту ^{90}Sr у риб становить 17% його середньорічної величини, ^{137}Cs — 50%.

**

The mechanisms of seasonal changes of ^{90}Sr and ^{137}Cs content in body of the freshwater fishes was studied by the methods of mathematical modeling. The maximum range of the seasonal variations of ^{90}Sr in fish is 17% of the annual mean, ^{137}Cs — 50%.

**

1. Беляєв В.В. Накопичення та виведення цезію-137 з організму гідробіонтів: Автореф. дис. ... канд. біол. наук. — К., 2001. — 18 с.
2. Гуськова В. Н., Засегетелев А. А., Ильин Б. Н. и др. Кинетика накопления радиоизотопов органами и тканями карпа-годовика при однократном загрязнении воды экспериментальных водоёмов смесью радионуклидов // Проблемы радиоэкологии водных организмов: Тр. Ин-та экологии растений и животных. — Свердловск, 1971. — Вып. 78. — С. 128—134.
3. Егоров В.Н. Динамические закономерности радиохемозкологических процессов в морской среде: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. — Киев, 1987. — 33 с.
4. Животный мир в зоне аварии Чернобыльской АЭС / Под ред. Л. М. Сущени, М. М. Пикулика, А. Е. Пленина. — Минск: Навука і тэхніка, 1995. — 263 с.
5. Ильенко А.И. Радиоэкология пресноводных рыб // Вопр. ихтиологии. — 1969. — Т. 9, вып. 2. — С. 324—337.
6. Константинов А.С. Общая гидробиология — М.: Высш. шк., 1986. — 472 с.
7. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Математическое моделирование миграции радионуклидов в водных экосистемах. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 152 с.
8. Куликов Н. В, Чеботина М. Я. Радиоэкология пресноводных биосистем. — Свердловск: Изд-во УрО АН СССР, 1988. — 129 с.

9. *Лебедева Г.Д.* Накопление и выведение радиоактивного стронция у пресноводных рыб при разных условиях // Тр. МОИП. Отд. биол. — 1968. — Т. 30. — С. 170—180.
10. *Насвіт О. И., Буянов Н. И., Кузьменко М. И.* Определение кинетических параметров процесса накопления радионуклидов компонентами экосистем по равновесным значениям коэффициентов концентрирования // Гидробиол. журн. — 1986. — Т. 22, № 5. — С. 97—100.
11. *Насвіт О., Деревець В., Кірсєв С., Ткаченко Ю.* Сезонна поведінка радіонуклідів у воді водойми-охолоджувача Чорнобильської АЕС // Радіоекологія Чорнобильської зони: Тез. доп. міжнар. наук. семінару, 27—28 вер. 2002 р., м. Славутич. — Славутич, 2002. — С. 134—135.
12. *Насвіт О.І., Беляєв В.В., Заліський О.О., Юрчук Л.П.* До питання про оцінку динаміки вмісту радіонуклідів у прісноводних рибах після аварії на ЧАЕС // Радіобіологічні ефекти: ризики, мінімізація, прогноз: Матеріали міжнар. конф., 22—24 бер. 2005 р., Київ. — К., 2005. — С. 127—138.
13. *Никольский Г. В.* Частная ихтиология. — М.: Высш. шк., 1971. — 471 с.
14. *Полякова Н. И.* Особенности накопления ^{137}Cs у рыб разных трофических уровней из водоёмов, загрязнённых радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — М., 2008. — 19 с.
15. *Попова О. А.* Роль хищных рыб в экосистемах // Изменчивость рыб пресноводных экосистем. — М.: Наука, 1979. — С. 13—47.
16. *Радиоекология водных объектов зоны влияния аварии на ЧАЭС /* Под ред. О. В. Войцеховича. — Киев: Чернобыльинтеринформ, 1997. — Т. 1. — 308 с.
17. *Романенко В.Д.* Основы гидроэкологии. — Киев: Генеза, 2005.— 664 с.
18. *Рябов И.Н.* Радиоэкология рыб водоёмов в зоне влияния аварии на Чернобыльской АЭС. — М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2004. — 215 с.
19. *Сабанеев Л. П.* Жизнь и ловля пресноводных рыб. — Киев: Урожай, 1994. — 608 с.
20. *Скаговский С.Н.* Экологическая физиология водных организмов — М.: Сов. наука, 1955. — 338 с.