

DOI: 10.21870/0131-3878-2023-32-3-84-96

УДК 504.75:539.1.047:594

## Линейно-пороговые эффекты $\gamma$ -облучения наземного моллюска *F. fruticum* М. третьей возрастной группы

Лаврентьева Г.В.<sup>1</sup>, Черкасова Е.Е.<sup>2</sup>, Мирзеабасов О.А.<sup>2</sup>, Шошина Р.Р.<sup>2</sup>, Сынзыныс Б.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга;

<sup>2</sup> Обнинский институт атомной энергетики – филиал ФГУАОУ ВПО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Обнинск

Экоцентрическая стратегия радиационной защиты предполагает расширение экспериментальных баз радиационно-индуцированных эффектов у представителей биоты. В данной работе изучено изменение релевантного показателя (смертность) наземного моллюска *F. fruticum* М. после  $\gamma$ -облучения дозами от 10 до 300 Гр. Наземный моллюск пока не входит в список референтных видов, однако отвечает требованиям МКРЗ, предъявляемым к референтным организмам. Цель работ: установление зависимостей «доза-эффект» при изучении смертности наземного моллюска *F. fruticum* М. третьей возрастной группы после острого  $\gamma$ -облучения для расширения баз данных о радиационно-индуцируемых эффектах биоты. Представлены результаты исследования для моллюсков только третьей возрастной группы, что является частью эксперимента по выявлению возрастных особенностей радиочувствительности представителя наземной малакофауны. Возраст моллюсков определяли по количеству оборотов раковины. Для проведения лабораторного эксперимента были подобраны условия содержания животных таким образом, что смертность в контрольной группе оставалась на нулевом уровне в течение всего эксперимента, длительность которого составила 210 дней. Показатель ЛД<sub>50/60</sub> для моллюска оценивался расчётным методом пробит-анализа с применением метода наименьших квадратов и составил 141,4±26,3 Гр. Изменение показателя оценивалось через каждые 30 дней после облучения. Для каждого временного диапазона, начиная с 60 сут после облучения, установлена линейно-пороговая зависимость с двумя пороговыми переходами на новый уровень летальности и, соответственно, тремя дозовыми диапазонами: дозозависимый диапазон при низких дозах облучения, дозозависимый диапазон при увеличении дозы облучения и дозозависимое плато при переходе на уровень абсолютной летальности. Установлены четыре дозовых диапазона проявления летальности наземного моллюска на протяжении 210 сут после облучения: 10-130 Гр (100% выживаемость), 140-160 Гр (абсолютная смертность через 180 сут), 170-190 Гр (абсолютная смертность через 150 сут), 200-300 Гр (100% летальность через 90 сут). При этом наибольшая динамика увеличения смертности отмечается в первые 60 сут после облучения.

**Ключевые слова:** экоцентрическая концепция, референтный вид, релевантный показатель, наземный моллюск, ЛД<sub>50/60</sub>, смертность,  $\gamma$ -облучение, пороговые эффекты, лабораторный эксперимент, радиационно-индуцированный эффект.

### Введение

В связи с развитием экоцентрического принципа нормирования радиационного фактора, основные аспекты которого отражены в публикациях МКРЗ [1-3], всё большее внимание уделяется изучению радиационно-индуцируемых эффектов у представителей биоты. Несмотря на существующий научно обоснованный набор «условных (референтных) животных и растений» (RAPs – reference animals and plants), предложенный МКРЗ [2], остаётся ряд нерешённых вопросов к его практическому применению, например, в конкретных природно-климатических условиях. В связи с этим рекомендуется проведение работ по заполнению существующих баз данных и обоснованию других референтных видов. В рамках данной работы установлены радиобиологические эффекты, возникающие у представителя наземной малакофауны – моллюска *Fruticicola*

Лаврентьева Г.В.\* – зав. каф., д.б.н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Черкасова Е.Е. – преподаватель; Мирзеабасов О.А. – доцент, к.т.н.; Шошина Р.Р. – доцент, к.б.н.; Сынзыныс Б.И. – проф., д.б.н. ИАТЭ НИЯУ МИФИ.

\*Контакты: 248000, Калужская обл., Калуга, ул. Баженова, 2. Тел.: +7 961 122 71 06; e-mail: lavrentyeva\_g@list.ru.

*fruticum M.* В качестве изучаемого показателя выступает смертность, рекомендуемая МКРЗ в качестве релевантного показателя. Следует отметить, что моллюски отвечают требованиям к RAPs, обладая широкой географической распространённостью; коротким жизненным циклом; простой геометрией для моделирования воздействия радиацией; возможностью идентификации радиационных эффектов на организменном уровне. Несмотря на то, что моллюски признаны радиорезистентными организмами, они обладают высокой аккумулярующей способностью по отношению к радионуклидам [4], что также является одним из требований МКРЗ (не радиочувствительность, а биоаккумуляция радионуклидов).

Стоит отметить, что многие исследования были проведены на водных моллюсках, обитающих в водоёмах, подвергшихся радиоактивному загрязнению [5, 6]. Представители водной малакофауны, а также почвенные беспозвоночные в качестве референтных организмов фигурируют в публикации Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) [7]. При этом накоплен достаточно большой массив экспериментальной информации о радиационно-индуцированных эффектах у моллюсков, включая морфологические, популяционные, генетические, поведенческие показатели [8].

Целью данной работы является установление зависимостей «доза-эффект» при изучении смертности наземного моллюска *F. fruticum M.* третьей возрастной группы после острого  $\gamma$ -облучения для расширения баз данных о радиационно-индуцируемых эффектах биоты. Экспериментальное исследование проведено в рамках цикла работ по изучению воздействия  $\beta$ - и  $\gamma$ -облучения на релевантные показатели наземных моллюсков, результаты которых отражены в публикациях [9, 10].

## Материал и методы

Объектом исследований является наземный моллюск *F. fruticum M.* Пробоотбор моллюсков производился в Калужской области на особо охраняемой природной территории на значительном расстоянии от города и промышленных предприятий. Моллюски отбирались в августе с растительности (преимущественно с крапивы) и с поверхности почвы ручным сбором. Для исследований отбирали особи третьей возрастной группы без видимых повреждений раковины. У моллюска *F. fruticum M.* выделяют четыре возрастные группы. Возраст моллюсков определяли по количеству оборотов раковины [9]. Для третьей возрастной группы количество оборотов составляет 4,25-5,0. Моллюски данной возрастной группы относятся к половозрелым, как и особи второй возрастной группы. При этом моллюски третьей возрастной группы старше, чем особи второй группы, в связи с чем, могут наблюдаться различные биологические эффекты при воздействии ионизирующего излучения.

**Лабораторный эксперимент.** Для выполнения лабораторного эксперимента были подобраны условия содержания моллюска, которые апробировались в течение трёх лет до начала эксперимента по облучению животных [11]. Необходимость подбора условий содержания обусловлена чувствительностью моллюсков к факторам внешней среды, что может сказываться на их питании, размножении, поведенческой активности [12]. Плотность моллюсков в контейнере составляет 25-35 особей на 1 м<sup>2</sup> [13].

Облучение моллюсков в диапазоне поглощённых доз от 10 до 300 Гр с шаговым отличием 10 Гр проводили на  $\gamma$ -установке ГУР 120. Мощность поглощённой дозы при облучении составляла 30 Гр/ч. Схема эксперимента в соответствии с шаговым отличием при облучении включает

30 проб по 15 особей моллюсков в каждой. Контрольная проба моллюсков не подвергалась облучению. Смертность моллюсков регистрировалась каждые 30 сут в течение 210 сут после облучения и определялась по следующим признакам: не реагирует на орошения водой; находится глубоко в раковине и нет плёнки, которая закрывает устье; из раковины вытекает мягкое тело; улитка источает очень неприятный запах; в результате раковина становится пустой. Полулетальная доза через 60 сут после облучения ( $LD_{50/60}$ ) определялась расчётным способом пробит-анализа с применением метода наименьших квадратов [14, 15].

**Статистическая обработка данных.** Экспериментальные данные обработаны с помощью программного пакета Microsoft Excel 2019 и программного пакета R [14]. На графиках представлены средние значения и стандартная ошибка среднего. Для определения значимости различий между средними значениями изучаемых показателей и контролем использовался t-тест Стьюдента. Уровень доверия по умолчанию равен 95%.

Линейно-кусочные модели определялись с учётом трёх параметров:  $D_s$  – доза достижения 100% смертности;  $D_p$  – доза, до которой смертность постоянна (пороговое значение);  $M_0$  – значение постоянной смертности до пороговой дозы ( $D_p$ ). Оценки средних значений параметров моделей проводились с использованием метода наименьших квадратов (в языке R метод реализован в функции `pls`), достоверность параметров оценивалась по статистике ошибок  $p < 0,05$ .

Зависимость изменения смертности моллюсков ( $M$ , %) от дозы облучения ( $D$ , Гр) определяется следующим образом:

$$\begin{cases} M(D) = M_0 & \text{при } D \leq D_p \\ M(D) = M_0 + (D - D_p) / (D_s - D_p) \cdot (100 - M_0) & \text{при } D_p < D < D_s \\ M(D) = 100 & \text{при } D \geq D_s \end{cases}$$

## Результаты и обсуждение

Анализ данных лабораторного эксперимента позволяет установить дозовую и временную зависимости изменения релевантного показателя (смертность) наземного моллюска при облучении в широком диапазоне доз – 10-300 Гр. Отметим, что условия содержания моллюсков подобраны таким образом, что в контрольной группе на протяжении 210 дней эксперимента отмечается 100% выживаемость особей.

В ранний период после облучения (до 30 сут) отмечается недостоверное изменение показателя смертности от контрольной группы более чем в 50% облучённых проб. Пороговое значение дозы при переходе к линейному увеличению показателя до 33% составляет 88,8 Гр.

В следующие временные диапазоны изменение смертности характеризуется линейно-пороговой зависимостью с переходами на новые уровни летальности: первый дозозависимый диапазон, второй дозозависимый диапазон, третий – дозозависимое плато при переходе к абсолютной летальности (табл. 1).

Через 60 сут после облучения установлено дозозависимое плато со смертностью моллюсков на уровне 11,3% при облучении дозой менее 74,5 Гр (рис. 1). При повышении дозы облучения отмечается увеличение смертности с переходом на абсолютный уровень летальности при облучении дозами более 285 Гр. Релевантный показатель увеличивается в 3 и 15 раз при облучении моллюсков дозами 10-130 Гр и 140-300 Гр соответственно.

Таблица 1

Параметры линейно-пороговых зависимостей

Сутки после облучения	Параметры модели		
	$M(D)=M_0$ при $D \leq D_p$	$M(D)=M_0+(D-D_p)/(D_s-D_p) \cdot (100-M_0)$ при $D_p < D < D_s$	$M(D)=100$ при $D > D_s$
60 сут	$M(D)=9,5$ при $D \leq 74,5$	$M(D)=9,5+0,528 \cdot (D-74,5)$ при $74,5 < D < 285$	$M(D)=100$ при $D \geq 285$
90 сут	$M(D)=11,4$ при $D \leq 77,2$	$M(D)=11,4+0,612 \cdot (D-77,2)$ при $77,2 < D < 222$	$M(D)=100$ при $D \geq 222$
120 сут	$M(D)=12$ при $D \leq 59,7$	$M(D)=12+0,633 \cdot (D-198,7)$ , $59,7 < D < 198,7$	$M(D)=100$ при $D \geq 198,7$
150 сут	$M(D)=14,4$ при $D \leq 67,6$	$M(D)=14,4+0,8 \cdot (D-174,5)$ , $67,6 < D < 174,5$	$M(D)=100$ при $D \geq 174,5$
180 сут	$M(D)=17,8$ при $D \leq 65,7$	$M(D)=17,8+1,12 \cdot (D-139)$ , $65,7 < D < 139$	$M(D)=100$ при $D \geq 139$
210 сут	$M(D)=20$ при $D \leq 67,7$	$M(D)=20+1,12 \cdot (D-139)$ , $67,7 < D < 139$	$M(D)=100$ при $D \geq 139$

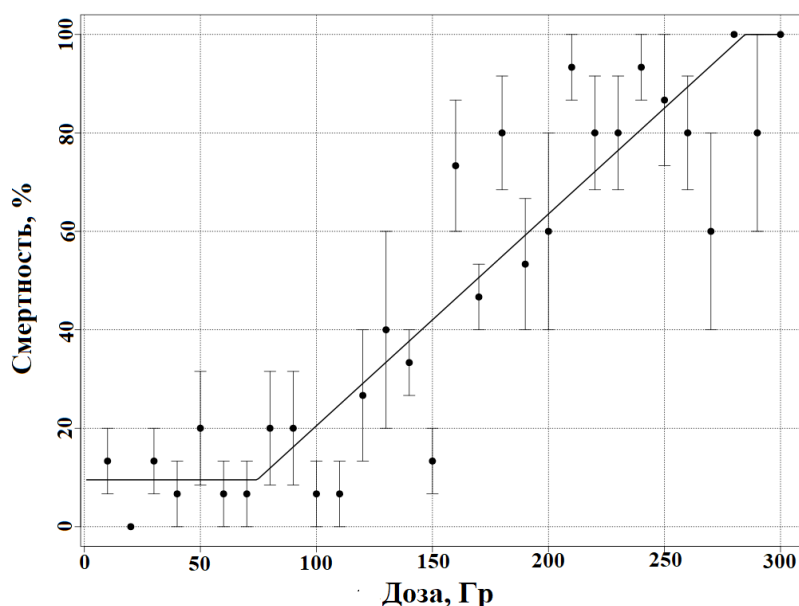


Рис. 1. Смертность моллюсков через 60 сут после облучения.

Через 90 сут после облучения отмечается увеличение смертности моллюсков в среднем в 2 раза по отношению к предыдущему периоду наблюдения (рис. 2). При этом наблюдается первый дозозависимый диапазон изучаемого показателя при облучении моллюсков дозами 10-77,2 Гр, который находится на уровне 11,4%. При дальнейшем увеличении дозы облучения наблюдается дозозависимое повышение смертности до перехода на уровень абсолютной летальности при достижении дозы 222 Гр.

Через 120 и 150 сут после облучения также установлена зависимость «доза-эффект» с тремя диапазонами (табл. 1, рис. 3, 4): дозозависимый диапазон при дозах облучения 59,7 Гр и 67,6 Гр соответственно; дозозависимый диапазон при увеличении дозы облучения до 198,7 Гр и 174,5 Гр соответственно; дозозависимое плато при переходе на уровень абсолютной летальности. При этом в первом дозовом диапазоне наблюдается незначительное (до 1,3%) увеличение показателя смертности относительно предыдущего периода наблюдения и достигает значений 12% и 14,4% через 120 и 150 сут наблюдений соответственно.

Увеличение смертности относительно 150 сут после облучения в 1,5 раза отмечается через 180 сут после облучения (рис. 5). В данный временной период также установлены пороговые

дозы при переходе на новые уровни летальности. При этом первая пороговая доза облучения от дозозависимого плато к дозозависимому диапазону изучаемого показателя составляет 65,7 Гр с сохранением смертности на уровне 17,8%. 139 Гр – второй дозовый порог при переходе к 100%-ной смертности моллюска.

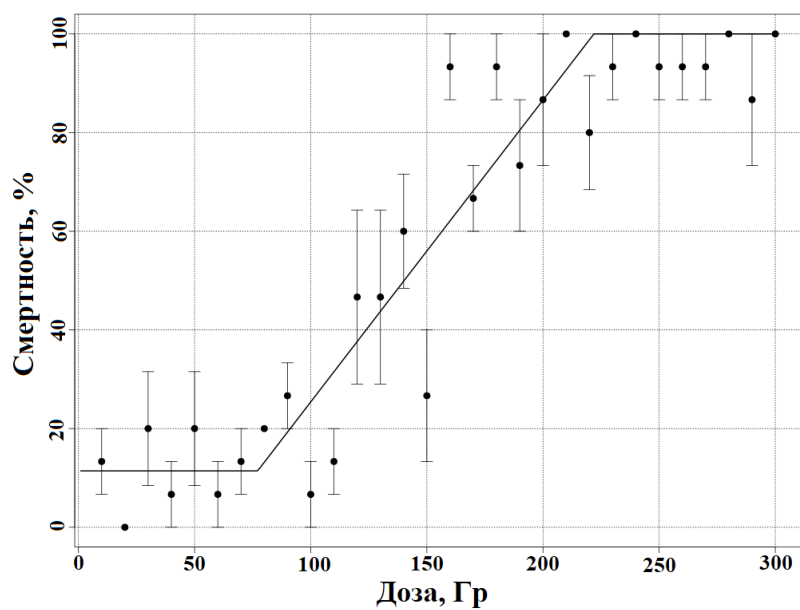


Рис. 2. Смертность моллюсков через 90 сут после облучения.

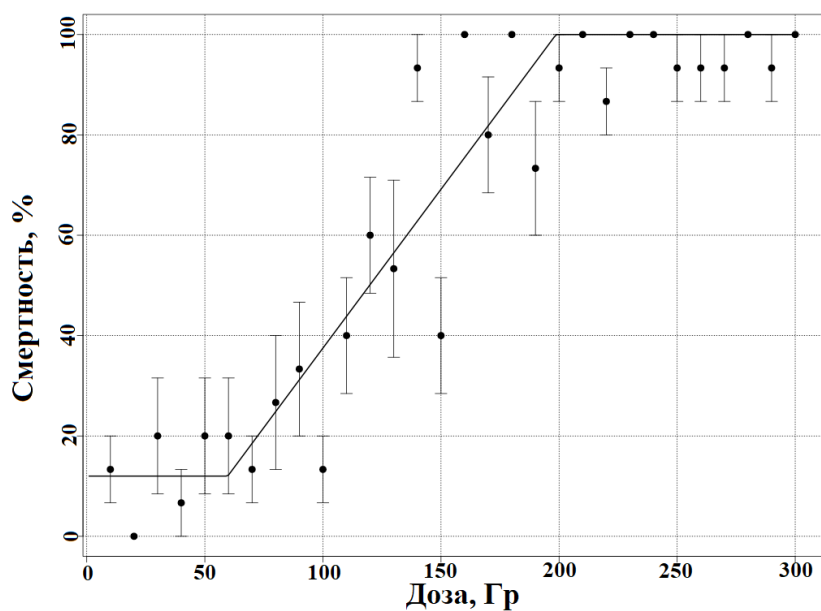


Рис. 3. Смертность моллюсков через 120 сут после облучения.

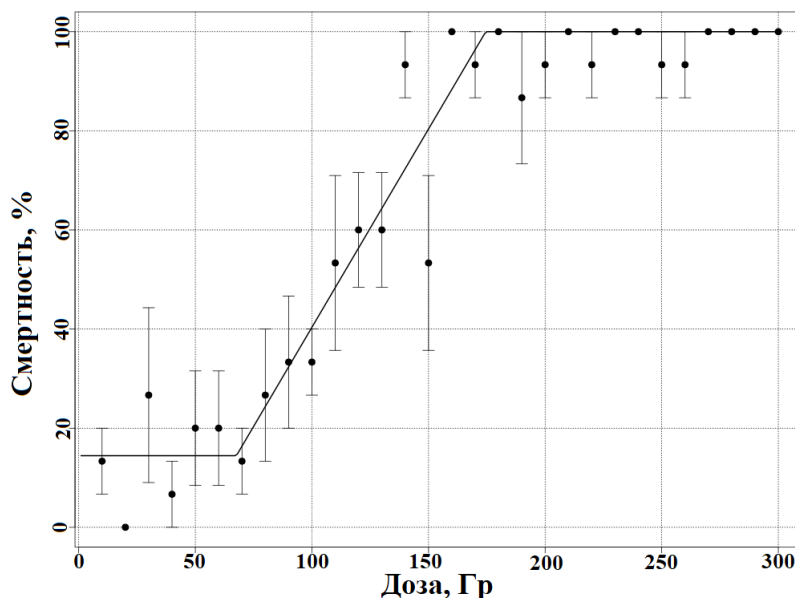


Рис. 4. Смертность моллюсков через 150 сут после облучения.

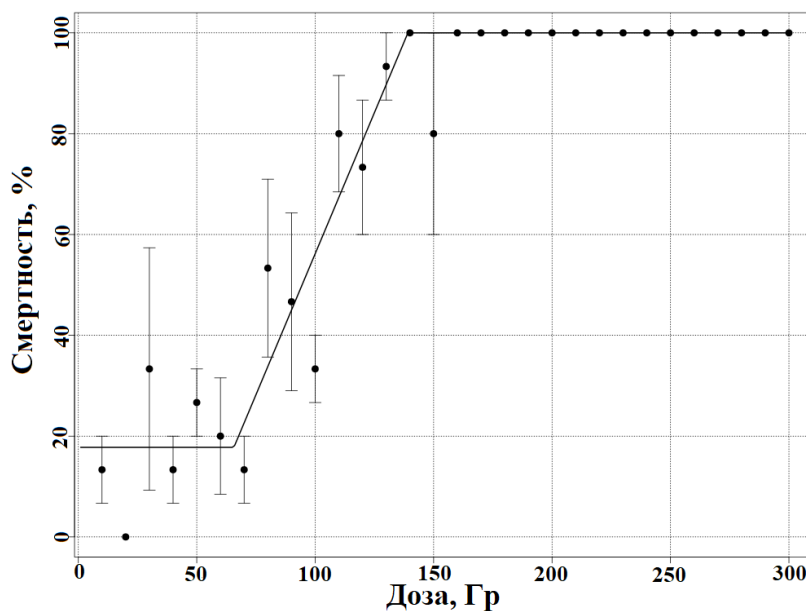


Рис. 5. Смертность моллюсков через 180 сут после облучения.

В самый отдалённый период после облучения (210 сут), предусмотренный экспериментом, сохраняется линейно-пороговая зависимость изменения показателя смертности от дозы облучения с тремя дозовыми диапазонами (рис. 6). Следует отметить, что на фоне незначительного увеличения относительно предыдущего периода наблюдения первого дозового порога до 67,7 Гр доза облучения при переходе к абсолютной смертности остаётся прежней (139 Гр). При этом показатель смертности в рамках первого дозозависимого плато увеличен до 20% относительно предыдущего временного диапазона эксперимента.

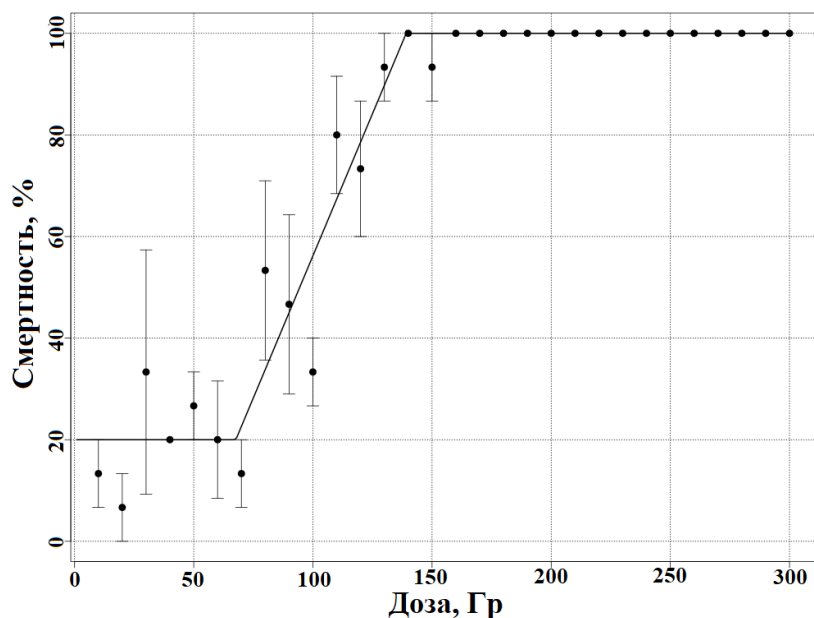


Рис. 6. Смертность моллюсков через 210 сут после облучения.

Следует отметить, что линейно-пороговые радиационно-индуцируемые эффекты обнаруживались и в экспериментах с другими биологическими объектами, например, при изучении летальности *Daphnia magna* [16] и *Drosophila melanogaster* [17], цитогенетических повреждений в корневой меристеме проростков ячменя [18], уровня белков металлотионеинов в мягких тканях моллюсков [8].

Для установления дозовых диапазонов, где наблюдаются идентичные закономерности изменения смертности во временной динамике, дозы облучения объединены в диапазоны 10-130, 140-160, 170-190 и 200-300 Гр с учётом достижения абсолютной смертности (рис. 7).

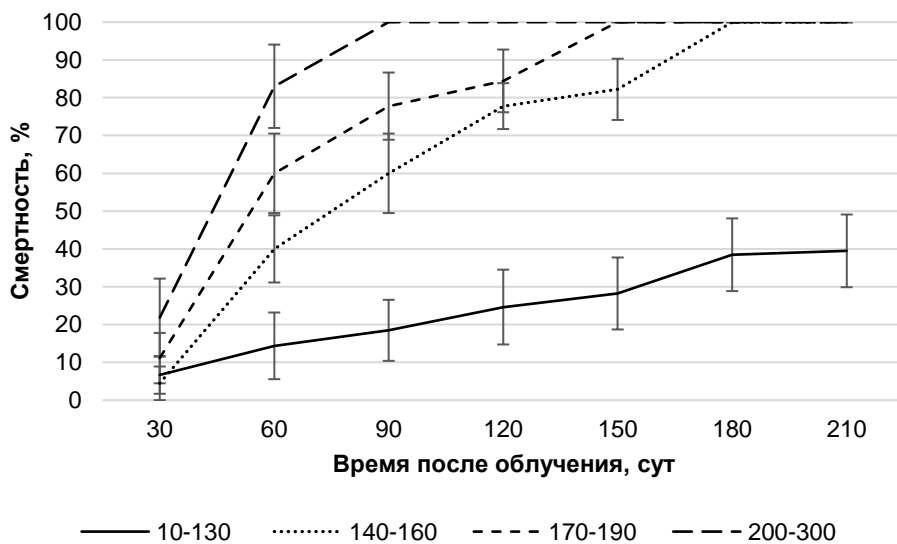


Рис. 7. Временная динамика изменения смертности моллюсков.

При облучении моллюсков в дозовом диапазоне 10-130 Гр абсолютная смертность не достигается на протяжении всего эксперимента (210 сут). При этом каждые 30 сут после облучения смертность увеличивается в среднем в 1,4 раза, а через 210 сут – в 5,9 раза относительно первого периода наблюдения.

В дозовом диапазоне 140-160 Гр показатель достигает 100% через 180 сут после облучения моллюсков. Максимальное увеличение показателя (в 9 раз) происходит в первые 60 сут, в следующие временные периоды эксперимента показатель увеличивается в среднем в 1,3 раза каждые 30 сут и достигает увеличения в 18,5 раза через 150 сут по отношению к первому периоду наблюдения. Увеличение показателя (в 2,6 раза) также отмечается относительно предыдущего дозового диапазона ( $p < 0,05$ ).

Сохраняется тенденция увеличения смертности с течением времени после облучения и относительно предыдущего дозового периода и при облучении моллюска дозами 170-190 Гр. При этом абсолютная смертность достигается через 150 сут после облучения. Наибольшее увеличение показателя (в 5,4 раза) отмечается также через 60 сут эксперимента на фоне последующего увеличения в 1,2 раза каждые 30 сут. Показатель увеличивается в среднем в 7,6 раза через 90 сут относительно первого временного периода и в 1,5 раза – относительно предыдущего дозового диапазона.

При увеличении доз облучения до 200-300 Гр отмечается раннее наступление абсолютной смертности моллюсков (через 90 сут) по сравнению с предыдущим дозовым диапазоном. Через 60 сут после облучения показатель увеличивается в 4,6 раза относительно первого временного периода наблюдения. Также отмечается увеличение смертности в 2,3 раза по сравнению с дозовым диапазоном 170-190 Гр.

Установлено, что максимальная динамика увеличения изучаемого показателя наблюдается в первые 60 сут после облучения моллюска, что отмечается для диапазонов облучения выше 140 Гр. Возможно, это связано с гибелью особей наиболее чувствительных к облучению. Подобные эффекты также обнаружены в исследовании, например, с дафниями [19], где авторы отмечают гибель наиболее радиочувствительных особей в ранний период после облучения дозами в 1000 раз меньше, чем  $LD_{50}$ .

Был определён показатель  $LD_{50/60}$  [20] для наземного моллюска *F. fruticum M.* третьей возрастной группы, который составляет  $141,4 \pm 26,3$  Гр. Следует отметить, что разброс значений показателя  $LD_{50}$  для представителей малакофауны в соответствии с различными источниками отличается на несколько порядков. Например, по данным НКДАР ООН доза 9 Гр приводит к резкому снижению плотности и видовому составу почвенной фауны [7], а показатель  $LD_{50}$  для водных моллюсков по разным источникам варьирует от 20 до 200 Гр [21] и даже до 500 Гр [22].

### Заключение

С учётом ранее проведённых лабораторных наблюдений [10, 11, 20] и результатов эксперимента, представленных в этой работе, показатель  $LD_{50/60}$  для наземного моллюска *F. fruticum M.* третьей возрастной группы составил  $141,4 \pm 26,3$  Гр.

Установлено радиационно-индуцируемое изменение релевантного показателя (смертность) представителя наземной малакофауны, которое описывается линейно-пороговой зависимостью. При этом в течение 210 сут после облучения для каждого временного диапазона (с шагом 30 сут) наблюдаются два пороговых перехода на новый уровень летальности. С течением времени после облучения моллюсков отмечается снижение порога летальности от 263 Гр через 60 сут до 139 Гр через 180 сут с сохранением пороговой дозы при переходе на абсолютный уровень летальности через 210 сут эксперимента.

На основании представленной в работе линейно-кусочной модели установлены четыре дозовых диапазона с различным проявлением изучаемого показателя в зависимости от времени после облучения. При этом дозовый ои диапазон облучения наземного моллюска 10-130 Гр не приводит к абсолютной смертности на протяжении 210 сут эксперимента; дозы в диапазоне 140-160 Гр вызывают абсолютную смертность моллюсков через 180 сут наблюдений; 170-190 Гр – через 150 сут; 200-300 Гр – через 90 сут после облучения.

Следует отметить, что в данной работе представлены установленные закономерности динамики смертности после облучения моллюска *F. fruticum M.* только третьей возрастной группы, что является частью эксперимента по выявлению возрастных особенностей радиочувствительности представителя наземной малакофауны.

Полученные данные о радиационно-индуцируемых эффектах у представителя наземной малакофауны расширяют базы данных радиобиологических эффектов у биоты в рамках развития экоцентрической концепции радиационной защиты.

## Литература

1. ICRP, 2008. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. ICRP Publication 108 //Ann. ICRP. 2008. V. 38, N 4-6. P. 1-234.
2. ICRP, 2009. Environmental protection: transfer parameters for reference animals and plants. ICRP Publication 114 //Ann. ICRP. 2009. V. 39, N 16. P. 1-111.
3. ICRP, 2014. Protection of the environment under different exposure situations. ICRP Publication 124 //Ann. ICRP. 2014. V. 43, N 1. P. 1-59.
4. **Lavrentyeva G., Shoshina R., Mirzeabasov O., Synzynys B.** Influence of Sr-90 on the morphometric indices and the level of proteins of metallothioneins in the soft tissues of terrestrial mollusks *Bradybaena fruticum* in the area of location of the regional radioactive waste storage facility //Physics, Engineering and Technologies for Biomedicine: book of abstracts of the 2nd International Symposium. M.: MEPhi, 2017. P. 246-247.
5. **Гудков Д.И., Назаров А.Б., Дзюбенко Е.В., Кагрян А.Е., Кленус В.Г.** Радиоэкологические исследования пресноводных моллюсков в Чернобыльской зоне отчуждения //Радиационная биология. Радиоэкология. 2009. Т. 49, № 6. С. 703-713.
6. **Романова Е.М., Индирякова О.А., Куранова А.П.** Перспективы использования моллюсков в биоиндикации водных объектов //Известия Оренбургского государственного аграрного университета. Биологические науки. 2008. Т. 4, № 20. С. 157-159.
7. Effects of radiation on the environment. UNSCEAR 2008. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II, Scientific Annex E. Effect of ionizing radiation on non-human biota. New York: United Nations, 2011.
8. **Лаврентьева Г.В., Шошина Р.Р., Мирзеабасов О.А., Сынзыныс Б.И.** Оценка влияния  $^{90}\text{Sr}$  на морфометрические показатели и уровень белков металлотиионеинов в мягких тканях сухопутных моллюсков *Bradybaena fruticum* на биотопе регионального хранилища радиоактивных отходов //Радиация и риск. 2017. Т. 26, № 4. С. 43-51.
9. **Черкасова Е.Е., Лаврентьева Г.В., Трофимова Л.А.** Влияние  $\gamma$ -облучения на биомассу наземного моллюска *Fruticola fruticum* разных возрастных групп //Современные проблемы радиобиологии, радиоэкологии и агроэкологии: сб. докладов IV Международной научно-практической конференции, 22-24 сентября 2021 г. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2021. С. 97-100.
10. **Черкасова Е.Е., Лаврентьева Г.В., Трофимова Л.А.** Влияние  $\gamma$ -облучения на релевантный показатель наземного моллюска *Fruticola fruticum* разных возрастных групп //Радиоэкологические последствия радиационных аварий: к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС: сб. докладов международной научно-практической конференции, 22-23 апреля 2021 г. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2021. С. 228-232.
11. **Черкасова Е. Е. Лаврентьева Г.В., Трофимова Л.А.** Обоснование возраста и условий содержания наземного моллюска *Fr. fruticum* для проведения лабораторных экспериментов //Будущее атомной энергетики – AtomFuture 2019: тезисы докладов XV Международной научно-практической конференции, 25-26 ноября 2019 г. Обнинск: ИАТЭ – НИЯУ «МИФИ», 2020. С. 18-19.
12. **Петухова Г.А.** Моллюски как чувствительные тест-индикаторы состояния перифитона при действии антропогенного пресса загрязнителей //Вестник Тюменского государственного университета. 2005. № 5. С. 97-100.
13. **Резник Е.П., Попов В.Н.** Разведение улиток *Helix Lucorum* и *Helix Albescens (Helicidae)* в условиях фермерского хозяйства в Крыму //Экосистемы, их оптимизация и охрана. 2010. Т. 21, № 2. С. 153-157.
14. **Шипунов А.Б., Балдин Е.М., Волкова П.А., Коробейников А.И., Назарова С.А., Петров С.В., Суфиянов В.Г.** Наглядная статистика. Используем R! М: ДМК Пресс, 2012. 298 с.
15. **Черкасова Е.Е., Лаврентьева Г.В., Сынзыныс Б.И.** Экспериментальное определение показателя полупетальной дозы для наземного моллюска *Fruticola Fruticum* //Международный научно-исследовательский журнал. 2022. Т. 119, №. 5. С. 162-167.
16. **Сарапульцева Е.И., Малина Ю.Ю., Сарапульцев Б.И.** Линейно-пороговые эффекты  $\gamma$ -облучения *Daphnia magna* в диапазоне малых доз //Радиация и риск. 2007. Т. 16, № 2-4. С. 33-38.

17. Скоробагатько Д.А., Страшнюк В.Ю., Мазилев А.А. Продолжительность жизни в потомстве *Drosophila melanogaster* после острого  $\gamma$ -облучения //Вестник Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина. Серия: Биология. 2016. № 26. С. 74-84.
18. Гераськин С.А., Дикарев В.Г., Удалова А.А., Дикарева Н.С. Закономерности индукции малыми дозами ионизирующего излучения цитогенетических повреждений в корневой меристеме проростков ячменя //Радиационная биология. Радиоэкология. 1999. Т. 39, № 4. С. 373-383.
19. Сарапутьцева Е.И., Горский А.И., Малина Ю.Ю. Радиационные риски смертности и сокращение продолжительности жизни  $\gamma$ -облучённых в малых дозах дафний //Радиация и риск. 2011. Т. 20, № 1. С. 34-40.
20. Черкасова Е.Е., Лаврентьева Г.В., Сынзыныс Б.И. Расчёт полуплетальной дозы облучения наземного моллюска *Fruticicola fruticum* //Сахаровские чтения 2022 года: экологические проблемы XXI века: материалы XXII Международной научной конференции, 19-20 мая 2022 г. Минск: Информационно-вычислительный центр Министерства финансов Республики Беларусь, 2022. Т. 1. С. 325-328.
21. Гудков И.Н., Кудяшева А.Г., Москалёв А.А. Радиобиология с основами радиоэкологии: учебное пособие. Сыктывкар: СыктГУ, 2015. 512 с.
22. Лазаревич Н.В., Сергеева И.И., Лазаревич С.С. Радиобиология: курс лекций. В 4 ч. Ч. 3. Радиобиология животных и человека. Горки: БГСХА, 2012. 103 с.

### Linear threshold effects of $\gamma$ -irradiation of the terrestrial mollusk *F. fruticum M.* of the third age group

Lavrentyeva G.V.<sup>1</sup>, Cherkasova E.E.<sup>2</sup>, Mirzeabasov O.A.<sup>2</sup>, Shoshina R.R.<sup>2</sup>, Synzynys B.I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch), Kaluga;

<sup>2</sup> Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk

The ecocentric strategy of radiation protection involves the expansion of experimental bases of radiation-induced effects in representatives of biota. In this article we studied the change in the relevant indicator (mortality) of the terrestrial mollusk *F. fruticum M.* after  $\gamma$ -irradiation with doses from 10 to 300 Gy. The terrestrial mollusk is not yet included in the list of reference species, but it meets the requirements of the ICRP for reference organisms. The aim of the work is to establish dose-effect relationships in the study of mortality of the terrestrial mollusk *F. fruticum M.* The third age group after acute  $\gamma$ -irradiation is used to expand databases on radio-induced effects of biota. The results of a study for mollusks of only the third age group are presented. This research is part of an experiment to identify age-related features of radiosensitivity of a representative of terrestrial malacofauna. The age of the mollusks was determined by the number of revolutions of the shell. The conditions for keeping animals in laboratory were selected in such a way that mortality in the control group remained at zero during the entire experiment. The duration of the experiment is 210 days. The LD<sub>50/60</sub> index for the mollusk was estimated by the calculated probit analysis method using the least squares method. The LD<sub>50/60</sub> is 141.4±26.3 Gy. The change in the indicator was estimated every 30 days after irradiation. A linear threshold dependence was established for each time range, starting from 60 days after irradiation. It contains two threshold transitions to a new level of mortality and, accordingly, three dose ranges: a dose-independent range at low doses of radiation, a dose-dependent range with an increase in the dose of radiation and a dose-independent plateau when switching to the level of absolute lethality. Four dose ranges of mortality of terrestrial mollusks were established for 210 days after irradiation: 10-130 Gy (100% survival rate), 140-160 Gy (absolute mortality after 180 days), 170-190 Gy (absolute mortality after 150 days), 200-300 Gy (100% mortality after 90 days). At the same time, the greatest dynamics of the increase in mortality is observed in the first 60 days after irradiation.

**Key words:** *ecocentric concept, reference species, relevant indicator, terrestrial mollusk, LD<sub>50/60</sub>, mortality,  $\gamma$ -irradiation, threshold effects, laboratory experiment, radiation-induced effect.*

Lavrentyeva G.V.\* – Head of Dep., D. Sc., Biol. Bauman Moscow State Technical University. Cherkasova E.E. – Teacher; Mirzeabasov O.A. – Associate Prof., C. Sc., Techn.; Shoshina R.R. – Associate Prof., D. Sc., Biol.; Synzynys B.I. – Prof., D. Sc., Biol. IATE of NRU MEPhI.  
\*Contacts: 2, Bazhenova str., Kaluga, Kaluga region, Russia, 248000. Tel.: +7 961 122 71 06; e-mail: lavrentyeva\_g@list.ru.

## References

1. ICRP, 2008. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. ICRP Publication 108. *Ann. ICRP*, 2008, vol. 38, no. 4-6, pp. 1-234.
2. ICRP, 2009. Environmental protection: transfer parameters for reference animals and plants. ICRP Publication 114. *Ann. ICRP*, 2009, vol. 39, no. 16, pp. 1-111.
3. ICRP, 2014. Protection of the environment under different exposure situations. ICRP Publication 124. *Ann. ICRP*, 2014, vol. 43, no. 1, pp. 1-59.
4. **Lavrentyeva G., Shoshina R., Mirzeabasov O., Synzynys B.** Influence of Sr-90 on the morphometric indices and the level of proteins of metallothioneins in the soft tissues of terrestrial mollusks *Bradybaena fruticum* in the area of location of the regional radioactive waste storage facility. *Book of abstracts 2nd Int. Symp. "Physics, Engineering and Technologies for Biomedicine"*. Moscow, MEPhI, 2017, pp. 246-247.
5. **Gudkov D.I., Nazarov A.B., Dzyubenko E.V., Kaglyan A.E., Klenus V.G.** Radioecological studies of freshwater mollusks in the Chernobyl accident exclusion zone. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya – Radiation Biology. Radioecology*, 2009, vol. 49, no. 6, pp. 703-713. (In Russian).
6. **Romanova E.M., Indiryakova O.A., Kuranova A.P.** Prospects for the use of mollusks in the bioindication of water bodies. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. Biologicheskiye nauki – Proceedings of the Orenburg State Agrarian University. Biological sciences*, 2008, vol. 4, no. 20, pp. 157-159. (In Russian).
7. *Effects of radiation on the environment*. UNSCEAR 2008. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II, Scientific Annex E. Effect of ionizing radiation on non-human biota. New York, United Nations, 2011.
8. **Lavrentyeva G.V., Shoshina R.R., Mirzeabasov O.A., Synzynys B.I.** Impact of <sup>90</sup>Sr on morphometric indices and metallothioneins level in the soft tissues of *Bradybaena fruticum* inhabiting the regional radioactive wastes storage facility. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2017, vol. 26, no. 4, pp. 43-51. (In Russian).
9. **Cherkasova E.E., Lavrentyeva G.V., Trofimova L.A.** The effect of  $\gamma$ -irradiation on the biomass of the terrestrial mollusk *Fruticicola Fruticum* of different age groups. *Rep. IVth Int. Scientific and Practical Conf. "Modern problems of radiobiology, radioecology and agroecology"*. Obninsk, RIRAE, 2021, pp. 97-100. (In Russian).
10. **Cherkasova E.E., Lavrentyeva G.V., Trofimova L.A.** Effect of  $\gamma$ -irradiation on the relevant indicator of the terrestrial mollusk *Fruticicola Fruticum* of different age groups. *Rep. Int. Scientific and Practical Conf. "Radioecological consequences of radiation accidents: on the 35th anniversary of the Chernobyl accident"*. Obninsk, RIRAE, 2021, pp. 228-232. (In Russian).
11. **Cherkasova E.E., Lavrentyeva G.V., Trofimova L.A.** Substantiation of the age and conditions of the terrestrial mollusk *Fr. fruticum* for laboratory experiments. *Abstracts XVth Int. Scientific and Practical Conf. "AtomFuture 2019"*. Obninsk, MEPhI, 2020, pp. 18-19. (In Russian).
12. **Petukhova G.A.** Mollusks as sensitive test indicators of the state of the periphyton under the action of anthropogenic pollutants. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the Tyumen State University*, 2005, no. 5, pp. 97-100. (In Russian).
13. **Ryevnik E.P., Popov V.N.** Perspective of snails (*Helicidae*) breeding in terms of farming in Crimea. *Ekosistemy, ikh optimizatsiya i okhrana – Ecosystems, their Optimization and Protection*, 2010, vol. 21, no. 2, pp. 153-157. (In Russian).
14. **Shipunov A.B., Baldin E.M., Volkova P.A., Korobeynikov A.I., Nazarova S.A., Petrov S.V., Sufiyarov V.G.** Naglyadnaya statistika. Ispol'zuyem R! [Visual statistics. Use R!]. Moscow, DMK Press, 2012. 298 p.

15. **Cherkasova E.E., Lavrentyeva G.V., Synzynys B.I.** Experimental observation of half lethal dose determinant for terrestrial mollusk *Fruticicola Fruticum*. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal – International Research Journal*, 2020, vol. 119, no. 5, pp. 162-167. (In Russian).
16. **Sarapultseva E.I., Malina Ju.Yu., Sarapultsev B.I.** Linear threshold effects of *Daphnia magna*  $\gamma$ -irradiation at low doses. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2007, vol. 16, no. 2-4, pp. 33-38. (In Russian).
17. **Skorobagat'ko D.A., Strashnyuk V.Yu., Mazilov A.A.** Life expectancy in the offspring of *Drosophila melanogaster* after acute gamma irradiation. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo universiteta imeni V.N. Karazina. Seriya: Biologiya – The Journal of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series: Biology*, 2016, no. 26, pp. 74-84. (In Russian).
18. **Geras'kin S.A., Dikarev V.G., Udalova A.A., Dikareva N.S.** Regularities of induction of cytogenetic damage in the root meristem of barley seedlings by small doses of ionizing radiation. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya – Radiation Biology. Radioecology*, 1999, vol. 39, no. 4, pp. 373-383. (In Russian).
19. **Sarapultseva E.I., Gorski A.I., Malina J.J.** Radiation risk of mortality and reduced life expectancy at daphnids gamma-irradiated at low doses. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2011, vol. 20, no. 1, pp. 34-40. (In Russian).
20. **Cherkasova E.E., Lavrentyeva G.V., Synzynys B.I.** Calculation of the half-year dose of the terrestrial mollusk *Fruticicola Fruticum*. *Materials XXIIInd Int. Conf "Sakharov readings 2022: environmental problems of the XXI century*. Minsk, 2022, vol. 1, pp. 325-328. (In Russian).
21. **Gudkov I.N., Kudyasheva A.G., Moskalev A.A.** Radiobiologiya s osnovami radioekologii [Radiobiology with the basics of radioecology]. Syktyvkar, Syktyvkar State University, 2015. 512 p. (In Russian).
22. **Lazarevich N.V., Sergeyeva I.I., Lazarevich S.S.** Radiobiologiya: kurs lektsiy. Radiobiologiya zhivotnykh i cheloveka [Radiobiology: a course of lectures. Radiobiology of animals and humans]. Gorki, BGSMA, 2012. 103 p. (In Russian).