

## ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОРАЖЕНИЯ ПИЩЕВАРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА МОНОГАСТРИЧНЫХ ЖИВОТНЫХ ИНКОРПОРИРОВАННЫМИ РАДИОАКТИВНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

© 2023 г. С. Г. Шаповалов<sup>1,\*</sup>, Г. В. Козьмин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия*

*\*E-mail: shapovalovstanislav93@gmail.com*

Поступила в редакцию 08.07.2022 г.

После доработки 26.11.2022 г.

Принята к публикации 21.12.2022 г.

Представлен анализ дозиметрических параметров, вызывающих язвенно-некротическое поражение желудочно-кишечного тракта моногастричных животных (крысы, морские свинки, свиньи), обусловленное перорально поступившими “горячими” радиоактивными частицами. Разработаны математические модели транспорта частиц и формирования поглощенных доз в отделах пищеварительного тракта. Приведены особенности глубинного распределения поглощенных доз в слизистой оболочке в зависимости от спектральных характеристик  $\beta$ -излучения радионуклидов, входящих в состав силикатных частиц. Показано, что основными факторами формирования очагов язвенного поражения пищеварительного тракта были неравномерное распределение частиц в содержимом и концентрирование частиц на отдельных участках слизистой оболочки с последующим формированием высоких локальных дозовых нагрузок. Предложена дозиметрическая шкала крайне тяжелой, тяжелой, средней и легкой степени острого радиационного язвенного гастроэнтероколита, позволяющая экстраполировать результаты модельных экспериментов на сценарии радиоактивного загрязнения окружающей среды частицами различного генезиса. Полученные результаты могут быть приняты во внимание в задачах радиационной безопасности.

**Ключевые слова:** горячие радиоактивные частицы, внутреннее облучение, биологическое действие, пищеварительный тракт, моногастричные животные, крысы, морские свинки, свиньи, поглощенные дозы, острый радиационный язвенный гастроэнтероколит

DOI: 10.31857/S0869803123020091, EDN: EOZZTY

Исследования биологического действия радиоактивных частиц (РЧ) различного генезиса в настоящее время являются актуальным направлением радиобиологии. Образование РЧ может происходить при радиационных авариях, ядерных взрывах, применении “грязных” бомб, вследствие радиоактивных выбросов и сбросов предприятий атомной промышленности, а также объектов производства сырья и материалов с повышенным содержанием естественных радионуклидов [1–4].

В экспериментах на сельскохозяйственных и лабораторных животных было показано, что при пероральном поступлении в организм животных одинаковых активностей продуктов ядерного деления возрастом 10–15 ч в виде растворов и труднорастворимых частиц последние отличаются более выраженным биологическим действием, специфика которого обусловлена радиационным язвенно-некротическим поражением пищеварительного тракта [5, 6]. По совокупности симптомов болезнь квалифицировали как острый радиационный язвенный гастроэнтероколит [7]. Бо-

лезнь представляла собой патологическое состояние, существенно отличающееся от описанной в литературе кишечной формы острой лучевой болезни, очаговостью язвенных поражений ЖКТ, четко выраженной периодичностью процесса и его относительно продолжительным течением.

Для сбора, обобщения и анализа информации по закономерностям поведения РЧ в природной окружающей среде, последствий вовлечения РЧ в пищевые цепочки животных и человека под эгидой МАГАТЭ в 2013–2020 гг. выполнялся специальный международный проект (Research Project “Environmental Behaviour and Potential Biological Impact of Radioactive Particles” (K41013) [8]. Отдельные вопросы последствий ингаляционного и перорального поступления радиоактивных частиц почвы, активированных нейтронами ядерного взрыва, изучались в рамках международного многоцентрового исследования в 2016–2019 гг. (Япония, Казахстан, Россия) [9, 10] в целях ретроспективной оценки радиационного воздей-

ствия на население в результате ядерного удара США по Хиросиме и Нагасаки (Япония) [11].

Целью настоящего исследования стали проведение анализа дозиметрической картины внутреннего облучения инкорпорированными “горячими” радиоактивными частицами и установление дозиметрической шкалы степеней проявления острого радиационного язвенного гастроэнтероколита у моногастричных животных (крыс, морских свинок, свиней), обладающих пищеварительным трактом, сходным по строению с ЖКТ человека, и выполняющих роль референтных организмов (грызуны [12]) в задачах оценки радиационного риска загрязнения окружающей среды радионуклидами для биоты и человека.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

### *Объекты исследования*

Изучение биологического действия “горячих” радиоактивных частиц проводили на лабораторных грызунах обоего пола — крысах породы Вистар массой 200–300 г, беспородных морских свинок массой 300–600 г, поросятах крупной белой породы, ландрасах и поросятах помесной породы (помесь крупной белой и ландраса) возрастом 2–2.5 мес. и массой от 25 до 30 кг, благополучных по инфекционным и инвазионным заболеваниям.

### *“Горячие” радиоактивные частицы*

В экспериментах использовали силикатные оплавленные РЧ “трехкомпонентной”, “урановой” и “рениевой” моделей диаметром от 80 до 160 мкм, которые приближенно моделировали радиационные характеристики продуктов мгновенного деления (ПМД) возрастом от 10 до 15 ч [13].

“Трехкомпонентные” модельные частицы [14] представляли собой стеклосферы, в структуру которых в определенном соотношении были вплавлены стабильные элементы:  $^{164}\text{Dy}$ ,  $^{141}\text{Pr}$  и  $^{89}\text{Y}$ . После облучения частиц на ядерном реакторе в потоке тепловых нейтронов получали радионуклиды  $^{165}\text{Dy}$  (42%),  $^{142}\text{Pr}$  (45%) и  $^{90}\text{Y}$  (13%), моделирующие спад активности ПМД возрастом 10 ч.

Для получения радиоактивных частиц “урановой” модели [15] силикатные частицы, на поверхность которых наносили соли  $^{235}\text{U}$  (уранил  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), активировались в потоке тепловых нейтронов. При этом осколки продуктов деления распределялись в поверхностном слое стеклосфер. Модель наиболее полно имитировала радиационные характеристики частиц локальных выпадений ядерного взрыва на силикатных почвах, но создавала сложности выполнения требований радиационной безопасности в связи с

относительно высокими уровнями  $\gamma$ -облучения персонала.

РЧ на основе природного рения (“рениевая” модель [16]), включающие после нейтронной активации  $^{186}\text{Re}$  и  $^{188}\text{Re}$ , более точно по сравнению с “трехкомпонентной” моделью имитировали спектр  $\beta$ -излучения ПМД возрастом более 1 сут.

Растворимость “урановых” ОРЧ в кислой и щелочной среде не превышала 5%, а “трехкомпонентных” и “рениевых” ОРЧ — не более 1–2%. Активность частиц, поступивших в ЖКТ, варьировала от 100 до 1500 МБк/кг массы тела животных. Зависимости средней энергии  $\beta$ -излучения и активности “трехкомпонентных”, “урановых” и “рениевых” модельных частиц от времени представлены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что “трехкомпонентная” и “урановая” модели близки по характеру спада активности в зависимости от времени. “Рениевая” модель демонстрирует более медленное снижение активности и использовалась для оценки поражающего действия ПМД возрастом более суток. Средняя энергия  $\beta$ -излучения “трехкомпонентной” модели, в отличие от РЧ “урановой” и “рениевой” моделей, возрастает с течением времени. Основным экспериментальным материалом радиобиологических исследований был получен с использованием частиц “трехкомпонентной” модели. Применение частиц этой модели позволяло оценить максимально возможные радиобиологические последствия загрязнения внешней среды ПМД в виде труднорастворимых частиц. В исследованиях биологического действия продуктов ядерного деления в виде радиоактивных частиц локальных выпадений наземного ядерного взрыва была принята концепция ведущей роли в радиационном поражении  $\beta$ -излучения [7, 17, 18], так как дозы внутреннего  $\gamma$ -облучения организма сельскохозяйственных животных при использовании “урановой” модели РЧ не превышали 10% от поглощенной дозы  $\beta$ -излучения в критическом отделе ЖКТ [13].

### *Методика “затравки” животных и исследований транспорта РЧ в ЖКТ*

Специальные алюминиевые блочки с оплавленными радиоактивными частицами массой до 4 г в каждой кварцевой ампуле после транспортировки с ядерного реактора вскрывали в камере 2УКЗ с помощью манипуляторов. В опытах с грызунами радиоактивные частицы взвешивали путем барботирования в 2.5%-ном геле картофельного крахмала. Рассчитанные количества РЧ вводили внутривентрикулярно через металлический зонд с помощью шприца. Общий объем геля, содержащего РЧ, не превышал 2.5–3 мл на одно лабораторное животное. Поступление частиц в орга-

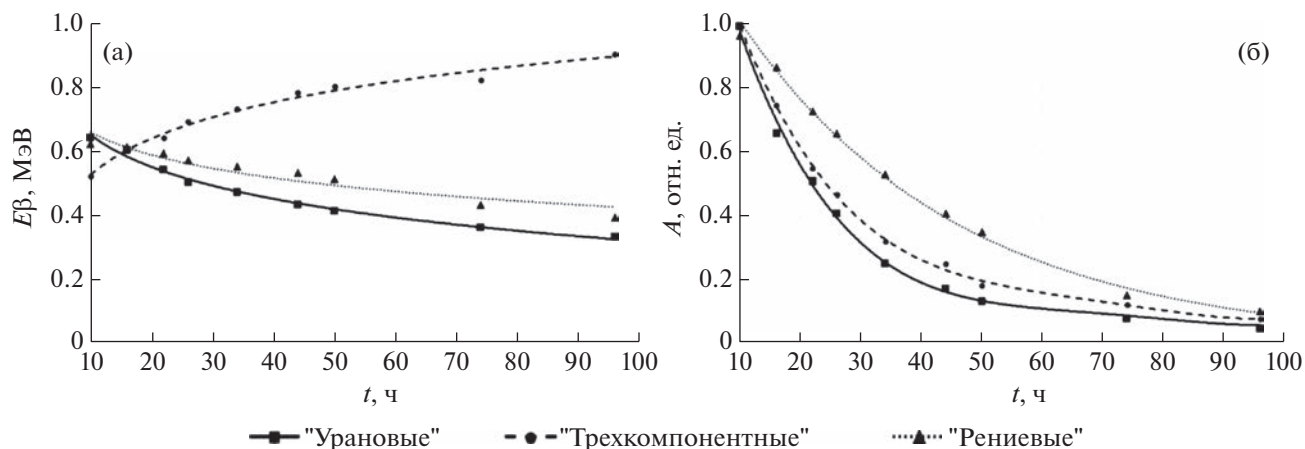


Рис. 1. Зависимости от времени средней энергии  $\beta$ -излучения (а) и убыли активности (б) модельных частиц [15].

Fig. 1. Dependences on the time of the average energy of  $\beta$ -radiation (a) and the decrease activity (b) of model particles [15].

низ крыс и морских свинок контролировали дозиметрическим прибором ДРГЗ-03 (Россия), с помощью которого проводили измерения мощности дозы  $\gamma$ - и тормозного излучения в области желудка до и после введения РЧ [19, 20]. В опытах на поросятах модельные ОРЧ высыпали в кормушку, содержащую 100 г комбикорма, и сверху присыпали небольшим количеством корма. После транспортировки кормушки ее устанавливали в индивидуальной обменной клетке, в которой животное находилось в период всего времени наблюдения. Потребление поросятами РЧ контролировали измерением мощности дозы от излучения кормушки до и после скармливания [21].

Регулярно выполняли полный сбор выделений фекалий со взвешиванием и отбором средних проб для каждого животного. При убое осуществляли анатомическую разделку ЖКТ животных по всем его отделам с предварительной перевязкой каждого из них. Желудок, тонкий и толстый отделы кишечника отдельно взвешивали с содержимым и без него, а затем отбирали средние пробы содержимого и фрагментов стенок отделов.

Радиометрию проб выполняли по  $\beta$ -излучению счетчиком Т-25-БФЛ на радиометрической установке "Волна" (Россия). Радиометрию по  $\gamma$ - и тормозному излучению в опытах с лабораторными животными проводили с использованием сцинтилляционного счетчика УСС-1 (Россия), а в опытах на поросятах также с помощью колодезной ионизационной камеры ВАК-254 эталонного гамма-дозиметра ВАЖ-18 (Германия). Погрешность радиометрических анализов не превышала 15–20% [13]. Результаты радиометрического анализа позволили определить динамику изменения во времени содержания РЧ в желудке и кишечнике животных после однократного поступления радиоактивных частиц. Результаты экспериментальных исследований изменения содержания

ОРЧ в отделах ЖКТ моногастричных животных представлены в табл. 1–3.

#### Оценка биокинетических параметров транспорта радиоактивных частиц в ЖКТ моногастричных животных

Оценку биокинетических параметров транспорта РЧ в ЖКТ животных проводили с помощью компартментального анализа [22] динамики содержания РЧ в отделах пищеварительного тракта после однократного поступления радиоактивных частиц. Критерием адекватности математического моделирования являлось достижение максимального значения коэффициента детерминации ( $R^2 \geq 0.70$ ) и минимального значения коэффициента несовпадения Тейла ( $U$ ) во всех камерах математической модели одновременно [23]. На конечном этапе поиска оптимальных биокинетических параметров для оценки достоверности математического моделирования применяли  $F$ -критерий Фишера [24], согласно которому, если величина его критического значения ( $F_{\text{крит}}$ ) больше величины его эмпирического значения ( $F_{\text{эмп}}$ ), то между экспериментальными результатами и результатами моделирования не обнаружено статистически значимых различий [25]. Расчеты выполняли путем решения системы дифференциальных уравнений в аналитическом виде, а также с применением численных методов расчета многофункциональной интерактивной вычислительной системы PTC Mathcad Prime 4.0.

#### Оценка дозиметрических параметров внутреннего облучения моногастричных животных

Расчет средней мощности дозы  $\beta$ -излучения на поверхности слизистой оболочки  $P_i(t)$  в  $i$ -х от-

**Таблица 1.** Среднее содержание ОРЧ (% от поступившего количества) в отделах ЖКТ крыс в зависимости от времени после однократного поступления ОРЧ с кормом [19]

**Table 1.** The average content of RP (% of the received amount) in the gastrointestinal tract of rats, depending on the time after a single intake of RP with feed [19]

| Время, ч | Отделы ЖКТ   |                        |                         | Фекалии     |
|----------|--------------|------------------------|-------------------------|-------------|
|          | желудок      | тонкий отдел кишечника | толстый отдел кишечника |             |
| 1        | 50.4 ± 10.1  | 48.9 ± 9.4             | 0.01 ± 0.002            | 0.7 ± 0.1   |
| 2        | 39.0 ± 8.2   | 53.3 ± 10.7            | 5.0 ± 1.1               | 2.7 ± 0.6   |
| 3        | 17.4 ± 3.5   | 37.0 ± 7.4             | 39.5 ± 7.1              | 6.1 ± 1.2   |
| 4        | 17.8 ± 4.5   | 25.7 ± 5.1             | 41.4 ± 10.8             | 15.1 ± 3.6  |
| 5        | 2.4 ± 0.5    | 3.6 ± 0.7              | 71.6 ± 12.9             | 22.4 ± 4.3  |
| 7        | 4.8 ± 1.1    | 11.6 ± 2.4             | 67.6 ± 12.2             | 15.8 ± 3.3  |
| 9        | 5.1 ± 1.2    | 1.5 ± 0.3              | 34.8 ± 6.3              | 58.6 ± 12.0 |
| 12       | 0.7 ± 0.1    | 0.2 ± 0.04             | 26.2 ± 5.0              | 72.9 ± 12.9 |
| 24       | 0.02 ± 0.004 | 0.09 ± 0.02            | 10.8 ± 1.9              | 89.1 ± 7.8  |
| 31       | 1.3 ± 0.3    | 0.07 ± 0.01            | 7.7 ± 1.5               | 90.3 ± 17.6 |
| 48       | 0.15 ± 0.03  | 0.03 ± 0.006           | 2.0 ± 0.4               | 97.8 ± 18.3 |

делах ЖКТ ( $i = 1, 2, 3$ ) проводили согласно выражению:

$$\overline{P}_i(t) = 2.88 \times 10^{-5} C_i(t - \tau) \overline{E}_\beta(t) \eta(t), \text{ Гр/ч} \quad (1)$$

где  $2.88 \times 10^{-5}$  — коэффициент, учитывающий размерность и геометрию облучения. Принято, что  $\beta$ -облучение слизистой оболочки желудка и толстого отдела кишечника происходит в  $2\pi$ -геометрии, а тонкого отдела кишечника — в  $4\pi$ -геометрии;  $C_i(t - \tau) = q_i(t - \tau)/m_i$  — удельная массовая активность ПЯД в содержимом (Бк/г)  $i$ -го отдела ЖКТ на время  $t$ , ч;  $\tau$  — время задержки выведения РЧ из желудка свиней. При  $t < \tau = 2$  ч  $q_i(t - \tau) = q_0$

(однократно поступившая в желудок активность) и  $q_2(t - \tau) = q_3(t - \tau) = 0$  (для грызунов  $\tau = 0$ );  $\overline{E}_\beta(t)$  — средняя энергия  $\beta$ -излучения ПЯД, МэВ;  $\eta(t)$  — функция, учитывающая радиоактивный распад, отн. ед.

Расчет динамики формирования средней поглощенной дозы  $\beta$ -облучения слизистой оболочки в отделах ЖКТ свиней проводили согласно выражению:

$$\overline{D}_i(t) = \int_0^t \overline{P}_i(t) dt, \text{ Гр} \quad (2)$$

Выражение (1) предполагает гомогенное распределение радиоактивных материалов в содержимом ЖКТ. Оно, как правило, используется в задачах, связанных с пероральным поступлением в организм животных радиоактивных растворов [26]. В случае поступления в организм животных с кормом радиоактивных частиц распределение РЧ в содержимом неравномерно [13], поэтому дозы, определенные с использованием (1), не будут в полной мере отражать реальной дозиметрической картины облучения ЖКТ. Отмеченное обстоятельство потребовало введение экспериментально полученных параметров неравномерности облучения поверхности слизистой оболочки. Качественную картину распределения радиоактивных частиц в содержимом отделов ЖКТ получали в опытах с крысами с использованием метода автордиографии [13]. Поглощенные дозы  $\beta$ -излучения в поверхностном слое слизистой пищеварительного тракта измеряли в опытах на поросятах с использованием термолюминесцентных детекторов на основе фтористого лития в соче-

**Таблица 2.** Среднее содержание ОРЧ (% от поступившего количества) в отделах ЖКТ морских свинок в зависимости от времени после однократного поступления ОРЧ с кормом [20]

**Table 2.** The average content of RP (% of the received amount) in the gastrointestinal tract of guinea pigs, depending on the time after a single intake of RP with feed [20]

| Время, ч | Отделы ЖКТ  |                        |                         | Фекалии     |
|----------|-------------|------------------------|-------------------------|-------------|
|          | желудок     | тонкий отдел кишечника | толстый отдел кишечника |             |
| 3        | 90.0 ± 16.2 | 3.0 ± 0.7              | 7.0 ± 1.3               | —           |
| 5        | 68.0 ± 12.8 | 4.5 ± 1.1              | 22.0 ± 4.4              | 5.5 ± 1.1   |
| 7        | 35.0 ± 5.3  | 3.0 ± 0.5              | 44.0 ± 8.8              | 18.0 ± 3.1  |
| 9        | 22.0 ± 3.3  | 2.0 ± 0.4              | 52.0 ± 9.8              | 24.0 ± 4.3  |
| 11       | 13.0 ± 2.3  | 1.0 ± 0.2              | 42.0 ± 7.6              | 44.0 ± 8.2  |
| 24       | —           | —                      | 6.0 ± 1.2               | 94.0 ± 18.9 |
| 48       | —           | —                      | 2.0 ± 0.4               | 98.0 ± 19.6 |

тании с установками для термовысвечивания VAM-30 (Германия) и TOLEDO (Великобритания).

Поглощенные дозы  $\beta$ -излучения на поверхности слизистой пищеварительного тракта животных измеряли с использованием термолюминесцентных детекторов на основе порошкообразного фтористого лития марки Dohna-lum LiF 200 Ti [27]. Навески порошка массой  $17 \pm 5$  мг помещали в квадратные пакетики площадью  $55 \pm 10$  мм<sup>2</sup>, изготовленные из лавсановой пленки толщиной 1.6 мг/см<sup>2</sup>. Для исключения проникновения жидкой компоненты содержимого ЖКТ в порошкообразный люминофор равномерно распределенные детекторы помещали между двух слоев лавсановой пленки. Общая площадь каждого из наборов детекторов составляла от 40 см<sup>2</sup> и более, а полная толщина экранирующей пленки — 3.2 мг/см<sup>2</sup>. Для исследования распределения поглощенной дозы  $\beta$ -излучения по поверхности слизистой оболочки желудка после убоя животного желудок немедленно замораживали жидким азотом, чтобы максимально избежать перераспределения ОРЧ в содержимом. После полного замораживания содержимого стенку желудка оттаивали, отслаивали от содержимого и между стенкой и замороженным содержимым размещали наборы детекторов. Экспонирование детекторов проводили в холодильной камере.

Так как детекторы были распределены по поверхности слизистой оболочки желудка равномерно, полагали, что распределение участков площадей слизистой  $\Delta S_k$  по уровню  $\beta$ -облучения в диапазонах мощностей доз  $\Delta P_k$  по измерениям  $n_k$  детекторов пропорционально  $n_k/n_0$ , где  $n_0$  — общее количество детекторов. При этом средневзвешенное по площади поверхности слизистой оболочки значение мощности поглощенной дозы составит:

$$\bar{P} = \sum \bar{P}_k \frac{n_k}{n_0}, \text{ Гр/ч} \quad (3)$$

где  $\bar{P}_k$  — средние арифметические значения мощности поглощенной дозы в  $k$ -х диапазонах по измерениям  $n_k$  детекторов.

Глубинное распределение поглощенной дозы  $\beta$ -облучения стенки желудка и тонкого отдела кишечника поросят “трехкомпонентными” и “рениевыми” модельными частицами оценивалось с использованием расчетного кода VarSkin 4.0.0 [28]. При этом использовали один из вариантов расчета дозы  $\beta$ -излучения, заложенный в коде VarSkin 4.0.0, от цилиндрического источника с радиусом, равным максимальному пробегу наиболее энергетических электронов на некоторой глубине в биологической ткани на основе численного интегрирования формулы Бергера для мощности дозы от точечного изотропного источ-

**Таблица 3.** Среднее содержание ОРЧ (% от поступившего количества) в отделах ЖКТ поросят в зависимости от времени после однократного поступления ОРЧ с кормом [21]

**Table 3.** The average content of RP (% of the received amount) in the gastrointestinal tract of piglets, depending on the time after a single intake of RP with feed [21]

| Время, ч | Отделы ЖКТ      |                        |                         | Фекалии         |
|----------|-----------------|------------------------|-------------------------|-----------------|
|          | желудок         | тонкий отдел кишечника | толстый отдел кишечника |                 |
| 2        | $86.4 \pm 17.3$ | $2.4 \pm 0.4$          | $0.08 \pm 0.02$         | $11.1 \pm 2.3$  |
| 4        | $77.4 \pm 15.5$ | $4.5 \pm 0.9$          | $6.4 \pm 1.5$           | $11.7 \pm 2.5$  |
| 8        | $61.1 \pm 12.2$ | $13.0 \pm 2.6$         | $13.0 \pm 3.3$          | $12.9 \pm 2.8$  |
| 12       | $47.2 \pm 9.4$  | $17.1 \pm 3.4$         | $23.6 \pm 4.7$          | $12.1 \pm 2.4$  |
| 14       | $37.6 \pm 7.5$  | $9.1 \pm 1.8$          | $19.9 \pm 3.9$          | $33.4 \pm 6.6$  |
| 18       | $3.1 \pm 0.7$   | $9.0 \pm 1.2$          | $46.2 \pm 7.5$          | $41.7 \pm 9.2$  |
| 24       | $12.6 \pm 3.7$  | $4.4 \pm 0.9$          | $32.3 \pm 5.9$          | $50.7 \pm 10.6$ |
| 34       | $2.7 \pm 0.5$   | $1.0 \pm 0.2$          | $21.3 \pm 4.3$          | $75.0 \pm 14.6$ |

ника [29]. Выбор для расчетов кода VarSkin 4.0.0 был обусловлен удовлетворительным согласием экспериментальных и расчетных данных, полученных в [30] при анализе глубинных распределений поглощенной дозы в кожном покрове человека для различных  $\beta$ -излучающих источников радиоактивного загрязнения.

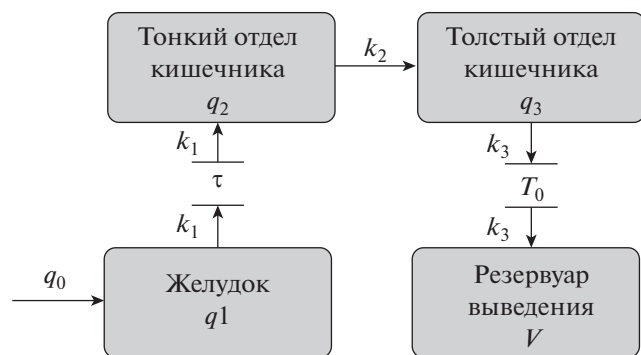
При оценке биологического действия РЧ на лабораторных животных использовали следующие показатели [31]:

— общее состояние животного (подвижность, угнетение или возбуждение, агрессивность, пугливость); состояние шерстного покрова и кожи (наличие отеков, кровоизлияний и т.п.);

— состояние слизистых оболочек рта и глаз (бледность, покраснение, синюшность, набухание, наличие кровоизлияний или эрозий, характер выделений);

— состояние органов дыхания, выделения из носа, кашель; в фекалиях определяли наличие скрытой крови.

Клиника радиационного поражения, динамика изменения массы, выживаемость, гематология и патологоанатомическая картина желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) у лабораторных животных исследовались после перорального введения модельных РЧ с активностью от 100 до 1500 МБк/кг массы тела, а у поросят после однократного потребления с кормом частиц с активностью 370 и 740 МБк/кг.



**Рис. 2.** Трехкамерная модель транспорта РЧ в ЖКТ моногастрических животных.

**Fig. 2.** Three-compartmental model of RP transport in the GIT of monogastric animals.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценку биокинетических параметров транспорта частиц в ЖКТ животных проводили с использованием представленной на рис. 2 камерной модели ЖКТ.

В модели используются следующие параметры транспорта, приведенные на рис. 2:

$q_0$  – количество РЧ, однократно поступившее в организм животных (100%);

$\tau$  – время задержки выведения РЧ из желудка поросят (2.5 ч), (для лабораторных животных  $\tau = 0$ );

$T_0$  – время задержки выведения РЧ из кишечника, ч. Для морских свинок время задержки в кишечнике составляло 2 ч. Для крыс  $T_0 = 0$ ;

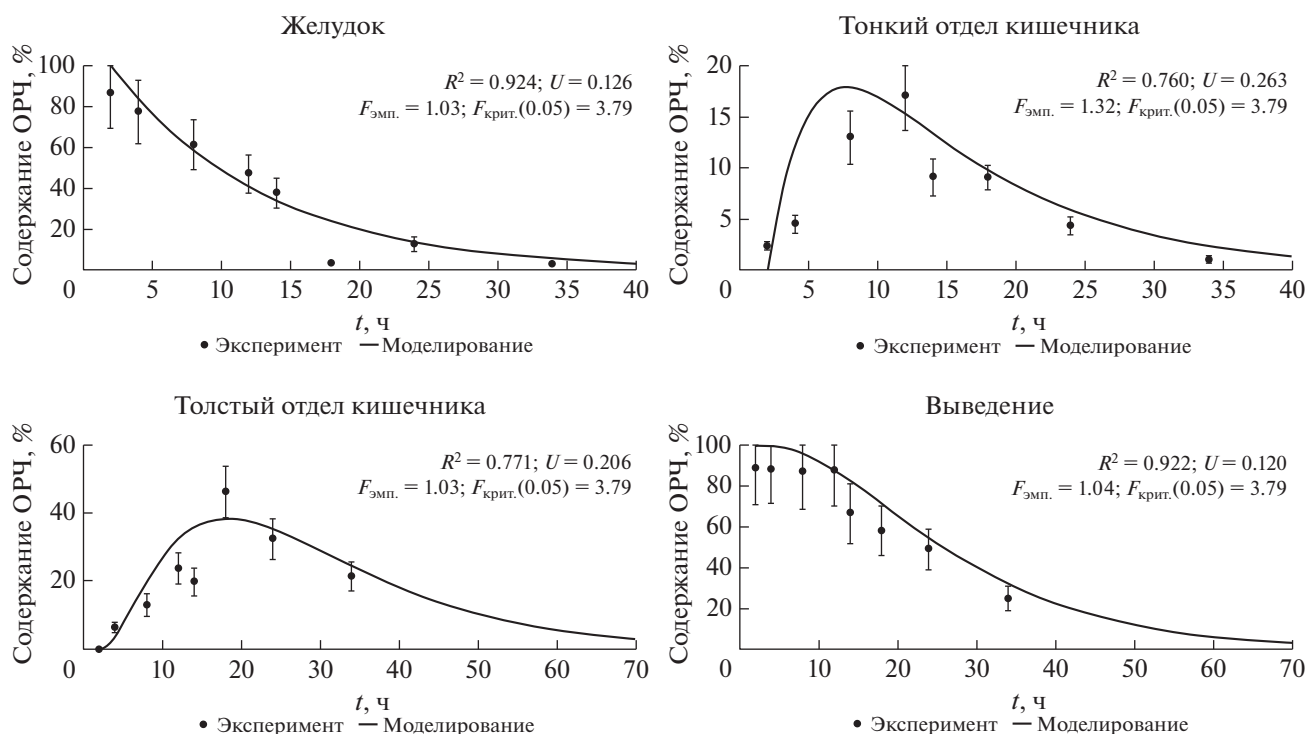
$q_1, q_2, q_3$  – содержание РЧ (% от поступившего количества) в отделах ЖКТ;

$V$  – содержание РЧ в резервуаре выведения (%);

$k_1, k_2, k_3$  – константы скорости выведения РЧ для каждого из отделов ЖКТ,  $\text{ч}^{-1}$ .

В качестве примера на рис. 3 показана динамика содержания РЧ в отделах ЖКТ поросят согласно данным расчета и экспериментальным результатам.

Использованные в расчетах значения констант скорости транспорта представлены в табл. 4. Там же приведены значения коэффициента детерминации ( $R^2$ ) в каком-либо отделе ЖКТ (камере), полученные при компартментальном моделировании транспорта РЧ в ЖКТ животных, адекватность которых была подтверждена рассчитанными величинами коэффициента несовпадения Тейла ( $U$ ) и путем использования ( $F$ ) критерия Фишера, при помощи которого удалось установить отсутствие статистически значимых различий между экспериментальными и расчетными значениями. Также в табл. 4 указаны значения среднего времени пребывания (удержания MRT) частиц в организме животных. Расчет MRT вы-



**Рис. 3.** Динамика содержания РЧ в ЖКТ поросят.

**Fig. 3.** Dynamics of the radioactive particles content in the gastrointestinal tract of piglets.

**Таблица 4.** Биокинетические параметры камерной модели ЖКТ крыс, морских свинок, свиней и среднее время пребывания РЧ в организме животных**Table 4.** Biokinetic parameters of the compartmental model in the GIT of rats, guinea pigs, and pigs and the mean retention time of feed and RP in the animal body

| Вид животного  | Биокинетические параметры модели, ч <sup>-1</sup> |       |       | Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) |                 |                  | Среднее время пребывания (MRT), ч |      |
|----------------|---------------------------------------------------|-------|-------|------------------------------------|-----------------|------------------|-----------------------------------|------|
|                | $k_1$                                             | $k_2$ | $k_3$ | желудок                            | тонкий кишечник | толстый кишечник | кормовые массы                    | РЧ   |
| Крысы          | 0.430                                             | 0.420 | 0.108 | 0.971                              | 0.775           | 0.821            | 13–18 [33, 34]                    | 14.0 |
| Морские свинки | 0.123                                             | 1.710 | 0.096 | 0.917                              | 0.895           | 0.820            | 12–18 [35, 36]                    | 21.0 |
| Свиньи         | 0.090                                             | 0.030 | 0.075 | 0.924                              | 0.760           | 0.771            | 40–49 [37–39]                     | 56.5 |

полняли методом статистических моментов [32] согласно выражению:

$$MRT = \tau + T_0 + \frac{\int_0^{\infty} F(\theta)\theta d\theta}{\int_0^{\infty} F(\theta)d\theta}, \text{ ч}, \quad (4)$$

где  $F(\theta)$  — функция выведения радиоактивных частиц (разгрузочная функция), являющаяся экспоненциальной аппроксимацией экспериментальных данных динамики эвакуации РЧ,  $F(\theta) = 1 - V(t)$ , %;  $\tau + T_0$  — время первого появления радиоактивных частиц в фекалиях животных после однократного поступления, ч (для крыс  $\tau = 0$ ,  $T_0 = 0$ ; для морских свинок  $\tau = 0$ ,  $T_0 = 2.5$  ч);  $\theta = t - \tau$ , при  $t \leq \tau$  значение  $F(\theta) = 1$ .

Из табл. 4 видно, что среднее время пребывания силикатных РЧ с размерами 80–160 мкм и непереваренных кормовых масс в пищеварительном тракте крыс одинаково, у морских свинок MRT РЧ незначительно превышает время пребывания корма, а у поросят MRT РЧ в среднем в 1.3 раза больше MRT частиц корма. Следует также отметить следующую интересную закономерность. Полученные в зарубежных источниках значения MRT непереваренных стандартных кормовых смесей, обладающих меньшей плотностью, имеют тенденцию к уменьшению и соответствуют нижнему пределу диапазонов MRT, представленных в табл. 4. Впервые зависимость скорости транспорта частиц корма и ряда инертных материалов в пищеварительном тракте животных и человека в зависимости от плотности материалов была отмечена и исследована американским физиологом Фредериком Хельцелем. Его эксперименты на различных животных и человеке (авторе исследований) с использованием узелков веревки и частиц с размерами до 1 мм из стекла, серебра и золота показали, что скорость

продвижения частиц обратно пропорциональна плотности материалов (табл. 5).

Среднее время прохождения пищи (остатков), упомянутых в табл. 5, оценивалось по времени прохождения различных непереваренных фрагментов пищи, волокнистых и других инертных материалов с размерами ~1 мм, которые были обнаружены при просеивании фекалий. У отдельных животных и человека были установлены отделы ЖКТ, где наблюдается задержка инертных частиц, обусловленная их гравитационным оседанием на поверхность слизистой. С использованием рентгенограмм было установлено, что тяжелые частицы движутся чаще всего всей массой вместе, а легкие распределены в содержимом отделов ЖКТ большей частью равномерно [40]. Аналогичный результат был получен в исследовании с “горячими” радиоактивными частицами с размерами 80–160 мкм [41]. На рис. 4 приведены радиogramмы желудков крыс, убитых через 1, 3 и 6 ч после орального введения ОРЧ.

Из радиogramм видно, что в течение первого часа РЧ равномерно распределены в содержимом желудка, а уже через 3 и 6 ч наблюдается значительное концентрирование частиц в кардиальной и пилорической частях желудка. При этом MRT РЧ в пищеварительном тракте крыс сопоставимо с MRT корма, находясь практически в середине соответствующего непереваренным частицам корма временного диапазона.

Причиной депонирования ОРЧ в кардиальной части желудка (в области перехода пищевода в желудок), по всей видимости, является кольцевой сфинктер (жом), препятствующий обратному выбросу пищи в пищевод. Задержке РЧ в пилорическом отделе желудка, в привратнике, способствует другой сфинктер, соединяющий желудок с двенадцатиперстной кишкой. Кроме этого, пилорус отличается глубокими желудочными ямками, где могут задерживаться радиоактивные частицы. Наряду с морфологическими особенностями желудка причиной депонирования РЧ может яв-

**Таблица 5.** Параметры прохождения различных материалов в ЖКТ человека [40]  
**Table 5.** Parameters of passage of various materials in the human gastrointestinal tract [40]

| Тип материала                 | Число экспериментов | Общее число тестируемого материала | % вышедших материалов | Среднее время прохождения, ч | Приблизительная плотность, г/см <sup>3</sup> |
|-------------------------------|---------------------|------------------------------------|-----------------------|------------------------------|----------------------------------------------|
| Газ (CO <sub>2</sub> )        | —                   | —                                  | —                     | 2–6                          | —                                            |
| Корм                          | —                   | —                                  | —                     | 25                           | 0.9–1.6                                      |
| Семена томатов                | 6                   | 75                                 | 100                   | 25.44                        | —                                            |
| Целлюлоза                     | 40                  | 930                                | 99.37                 | 26.76                        | 1.45                                         |
| Семена проса                  | 6                   | 80                                 | 100                   | 28.96                        | —                                            |
| Виноградные семена            | 8                   | 160                                | 100                   | 29.89                        | —                                            |
| Стеклянные бусинки            | 30                  | 800                                | 99.63                 | 40.15                        | 2.60                                         |
| Гравий (крупный песок)        | 3                   | 20                                 | 100                   | 52.31                        | —                                            |
| Стальные шариковые подшипники | 3                   | 20                                 | 100                   | 79.98                        | 7.70                                         |
| Серебро (изогнутая проволока) | 4                   | 35                                 | 100                   | 81.88                        | 10.53                                        |

ляться гравитационное осаждение силикатных частиц с плотностью, превышающей плотность кормов [40].

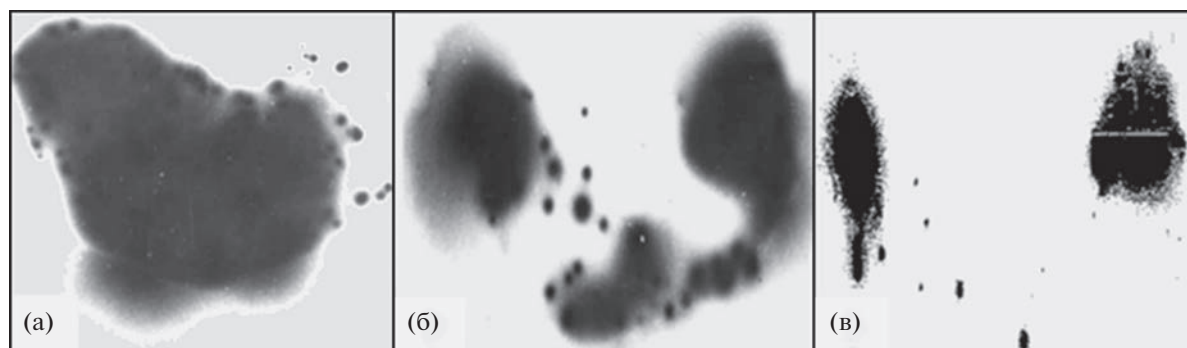
Депонирование ОРЧ в кардиальной и особенно в пилорической части желудка впоследствии приводило к проявлению наиболее интенсивного язвенного радиационного поражения на этих участках слизистой оболочки. Оценку поглощенных доз, вызывающих радиационное язвенное поражение ЖКТ, проводили поэтапно, выполняя следующие процедуры [42]:

- Определяли поглощенные дозы  $\beta$ -облучения слизистой оболочки исходя из предположения о гомогенном распределении РЧ в содержимом,  $2\pi$ -геометрии облучения слизистой оболочки желудка и толстого отдела кишечника и  $4\pi$ -геометрии облучения слизистой тонкого отдела кишечника. В расчетах использовали предложенные камерные модели транспорта РЧ в ЖКТ животных. Оценивали соотношения расчетных и из-

меренных величин мощностей поглощенных доз, средневзвешенных по площади поверхности слизистой оболочки.

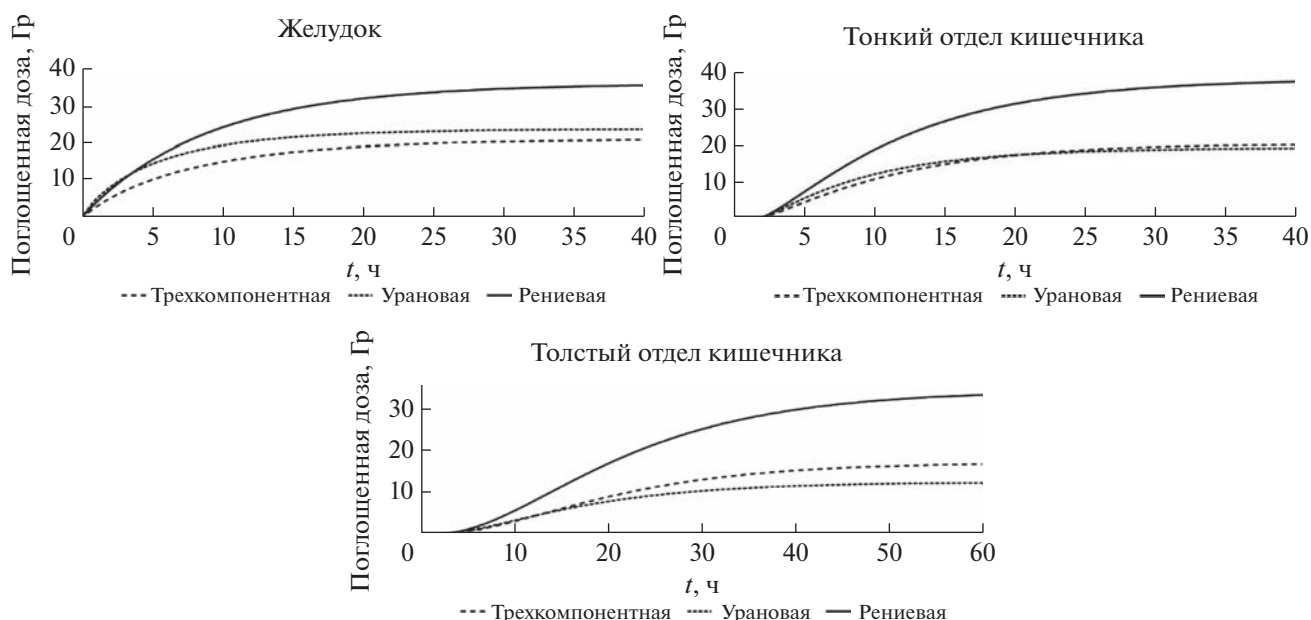
- Выполняли оценку мощностей поглощенных доз в областях концентрирования РЧ по данным автордиографии и/или по результатам прямых измерений на внутренней поверхности слизистой оболочки после убоя животных. Проводили оценку неравномерности облучения слизистой оболочки ( $P_{\max}/P_{\min}$ ) и максимально возможной кратности превышения средних уровней облучения ( $P_{\max}/P_{\text{aver.}}$ ).

- Проводили сравнение дозиметрических параметров с патологоанатомической картиной язвенно-некротического поражения слизистой оболочки с оценкой диапазонов поглощенных доз, вызывающих различные поражения слизистой оболочки.



**Рис. 4.** Радиограммы желудка крыс, убитых через 1 (а), 3 (б) и 6 (в) ч после орального введения РЧ [41].

**Fig. 4.** Radiograms of the stomach of rats slaughter 1 (a), 3 (b) and 6 (c) hours after ingestion of RP [41].



**Рис. 5.** Динамика формирования поглощенных доз  $\beta$ -облучения слизистой оболочки отделов ЖКТ поросят после однократного перорального поступления “трехкомпонентных”, “урановых” и “рениевых” модельных РЧ с активностью 740 МБк/кг массы животных.

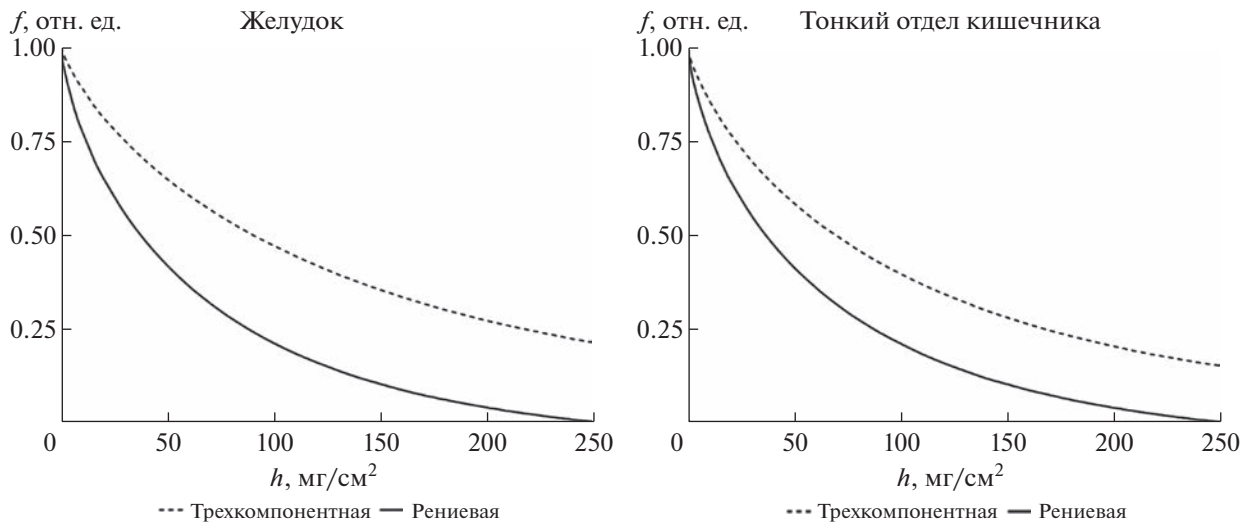
**Fig. 5.** Dynamics of formation of absorbed doses of  $\beta$ -irradiation of the mucous membrane of the GIT of piglets after a single oral intake of “three-component”, “uranium” and “rhenium” model RP with an activity of 740 MBq/kg of animal weight.

С использованием камерных моделей были получены зависимости формирования поглощенных доз  $\beta$ -облучения слизистой оболочки исходя из предположения о гомогенном распределении РЧ в содержимом отделов ЖКТ крыс, морских свинок и поросят [43]. Результаты расчетов показали, что при поступлении “трехкомпонентных” ОРЧ 95% поглощенной дозы в желудке формируется у морских свинок за 17 ч, у крыс за 10 ч, а у поросят более чем за 23 ч. 95% поглощенной дозы в тонком отделе кишечника у морских свинок формируется за 10 ч, у крыс за 8 ч, а у поросят за 28 ч. Аналогичный показатель для толстого отдела кишечника у морских свинок составляет 29 ч, у крыс 24 ч, а у поросят более 44 ч после однократного введения радиоактивных частиц. В качестве примера на рис. 5 представлена динамика формирования средних поглощенных доз  $\beta$ -облучения поверхности слизистой оболочки отделов ЖКТ поросят после однократного поступления с кормом РЧ “трехкомпонентной”, “урановой” и “рениевой” моделей с удельной активностью 740 МБк/кг массы тела животных.

Полученные результаты свидетельствуют о кратковременном характере радиационного воздействия радиоактивных частиц на пищеварительный тракт животных с длительностью, не превышающей полутора суток. Как видно из рис. 5, по величине сформировавшейся поглощенной дозы, доза  $\beta$ -облучения от “рениевой” модели в среднем в 2 раза превышает дозы для “трех-

компонентной” и “урановой” моделей. В то же время при пероральном поступлении одинаковых активностей РЧ для всех животных, использованных в настоящей работе, как и у овец в работе [6], было отмечено более выраженное поражение слизистой оболочки по всей ее глубине радиоактивными частицами “трехкомпонентной” и “урановой” моделей. Наблюдаемые различия в биологических эффектах были обусловлены разным характером глубинного распределения поглощенной дозы  $\beta$ -излучения. В связи с этим возникает необходимость расчета глубинного распределения доз  $\beta$ -облучения в стенке ЖКТ. На рис. 6 представлены функции ослабления сформированной дозы  $\beta$ -облучения в слизистой оболочке желудка и тонкого отдела кишечника поросят после однократного перорального поступления “трехкомпонентных” и “рениевых” модельных РЧ.

Из рис. 6 видно, что более “мягкое”  $\beta$ -излучение “рениевой” модели оказывает менее существенное воздействие на низлежащие слои стенки желудка и тонкого отдела кишечника поросят по сравнению с  $\beta$ -излучением “трехкомпонентной” модели. Величина средней поглощенной дозы в стенке желудка составляет 5.5 Гр для “трехкомпонентных” РЧ и 3.3 Гр для “рениевой” модели. Для тонкого отдела кишечника средние поглощенные дозы составили 5.1 Гр для “трехкомпонентной” модели и 3.4 Гр для “рениевой”



**Рис. 6.** Функции ослабления ( $f$ ) поглощенных доз  $\beta$ -облучения, сформированных за 25 ч в желудке и в тонком отделе кишечника поросят после поступления в организм ОРЧ, от глубины в биологической ткани.

**Fig. 6.** The functions of reduction ( $f$ ) of absorbed doses of  $\beta$ -irradiation formed in 25 hours in the stomach and in the small intestine of piglets after ingestion of RP, from the depth in the biological tissue.

модели. Средние поглощенные дозы в стенке отдела ЖКТ определяли в виде:

$$D_{\text{сред.}} = \int_{h_1}^{h_2} \frac{D(h)}{h_2 - h_1} dh, \text{ Гр} \quad (5)$$

где  $h_1$  — начальная, а  $h_2$  — максимальная глубина в биологической ткани,  $\text{мг/см}^2$ .

Количественная оценка неравномерности распределения мощностей доз  $\beta$ -излучения по поверхности слизистой оболочки была получена на примере желудка поросят и определена с помощью LiF детекторов, помещенных под стенку предварительно замороженных после уоя животных отделов ЖКТ (табл. 6).

Средневзвешенная по поверхности слизистой оболочки желудка мощность поглощенной дозы

**Таблица 6.** Распределение мощностей доз по стенке желудка поросенка, получившего однократно с кормом 370 МБк/кг “трехкомпонентных” ОРЧ

**Table 6.** Dose rate distribution along the (internal) stomach wall of a Piglet that received 370 MBq/kg “three-component” RP once with food

| $\Delta P$ , сГр/ч | $P_{\text{ср}}$ , сГр/ч | Число детекторов | Облучаемая площадь в % |
|--------------------|-------------------------|------------------|------------------------|
| 6–25               | $13 \pm 5$              | 12               | 15                     |
| 26–44              | $31 \pm 4$              | 36               | 46                     |
| 45–63              | $51 \pm 6$              | 20               | 25                     |
| 64–82              | $75 \pm 8$              | 6                | 8                      |
| 83–100             | $92 \pm 12$             | 2                | 3                      |
| 101–120            | $110 \pm 14$            | 2                | 3                      |

составила  $37 \pm 5$  сГр/ч, что удовлетворительно согласуется с расчетным значением, полученным при условии гомогенного распределения РЧ в содержимом желудка и  $2\pi$ -геометрии  $\beta$ -облучения слизистой оболочки (41 сГр/ч). Неравномерность распределения мощностей поглощенных доз, представленная в виде отношения  $P_{\text{max}}/P_{\text{min}}$ , достигает 20. При этом основная площадь слизистой оболочки желудка облучается дозами, близкими к среднему значению ( $\sim 71\%$ ), и  $\sim 14\%$  стенки облучается максимальными дозами, в  $\sim 3$  раза превышающими среднее расчетное значение, где наблюдались очаговые язвенные поражения слизистой оболочки в кардиальной и пилорической частях желудка.

На основании анализа повреждений ЖКТ, развития и исхода радиационного поражения организма лабораторных животных В.А. Киршиным, В.А. Бударковым и А.С. Зенкиным, в зависимости от величины поступившей активности РЧ, были выделены ниже представленные четыре степени острого радиационного язвенного гастроэнтероколита [44].

Крайне тяжелая степень была характерна тем, что болезнь протекала быстро. Исход болезни всегда смертельный — морские свинки погибали на 6–10-е сутки, крысы — на 4–6-е сутки после введения РЧ. У крыс язвенно-некротические изменения в ЖКТ, как правило, не успевали развиваться, отмечались гиперемии и геморрагии на слизистых оболочках. У морских свинок язвенно-некротические поражения слизистой оболочки были отмечены уже через 2 сут после введения РЧ.

Тяжелая степень отличалась от крайне тяжелой тем, что болезнь протекала более замедленно.

**Таблица 7.** Степени острого радиационного язвенного гастроэнтероколита в зависимости от поступившей активности и поглощенных доз в отделах ЖКТ  
**Table 7.** The degree of radiation ulcerative gastroenterocolitis depending on the received activity and absorbed doses in the GIT

| Форма болезни  | Удельная активность РЧ, МБк/кг | Вид животного  | Поглощенная доза, Гр |                 |                  |
|----------------|--------------------------------|----------------|----------------------|-----------------|------------------|
|                |                                |                | желудок              | тонкий кишечник | толстый кишечник |
| Легкая         | 100–370                        | Крысы          | 1.9–7.0              | 2.5–9.4         | 3.8–14.1         |
|                |                                | Морские свинки | 3.5–12.9             | 0.3–1.1         | 1.6–5.8          |
|                | до 370                         | Свиньи         | <10.6                | <10.3           | <8.6             |
| Средняя        | 370–1100                       | Крысы          | 7.0–20.9             | 9.4–27.9        | 14.1–41.8        |
|                |                                | Морские свинки | 12.9–38.5            | 1.1–3.4         | 5.8–17.0         |
|                | 370                            | Свиньи         | ~10.6                | ~10.3           | ~8.6             |
| Тяжелая        | 1100–1500                      | Крысы          | 20.9–28.5            | 27.9–38.0       | 41.8–57.0        |
|                |                                | Морские свинки | 38.8–52.5            | 3.4–4.7         | 17.0–23.2        |
|                | 740                            | Свиньи         | ~21.2                | ~20.6           | ~17.2            |
| Крайне тяжелая | >1500                          | Крысы          | >28.5                | >38.0           | >57.0            |
|                |                                | Морские свинки | >52.5                | >4.7            | >23.2            |
|                | >740                           | Свиньи         | >21.2                | >20.6           | >17.2            |

В начальный период заболевания (2–5 сут) на слизистой желудка и толстом отделе кишечника обнаруживали гиперемизированные участки. В разгар болезни (6–20 сут) на этих местах возникали язвенно-некротические поражения. Смертельные исходы наблюдали у морских свинок на 3–4-й неделе, у крыс на 2-й неделе после радиационного воздействия (погибло 40–80% животных). У поросят тяжелому поражению были подвержены все отделы ЖКТ, местами встречались язвы неправильной округлой формы, величиной от 2 до 10 см в диаметре, отмечен некроз глубоких слоев стенки желудка. Смертельные исходы (~60% животных) наблюдали на 28–50-е сутки.

Средняя степень была характерна тем, что клиническая картина болезни формировалась в те же сроки, что и при тяжелой степени, отмечали почти все перечисленные признаки с той разницей, что развивались они медленнее, а степень выраженности значительно слабее. В 20–40% случаев были возможны смертельные исходы.

Легкая степень отличалась тем, что болезнь протекала с маловыраженными клиническими симптомами. Существенно не изменялась масса тела, отмечено кратковременное понижение двигательной активности и пищевой возбудимости. Патологоанатомические исследования обнаруживали острый гастрит (до 15–20 сут). Смертельных исходов не было.

Полулетальные дозы  $LD_{50/30}$  по величине поглощенных доз  $\beta$ -облучения ЖКТ радиоактивными частицами желудка и толстого отдела кишечника морских свинок составили ~47 и ~11 Гр

соответственно. Для  $LD_{50/60}$  поглощенные дозы в желудке составили ~37 Гр, а в толстом кишечнике ~8.5 Гр. Подсвинки показали более высокую радиочувствительность. Формирование средних поглощенных доз облучения ЖКТ величиной около 10 Гр было способно приводить у них к летальным исходам. В табл. 7 представлены активности и дозиметрические показатели, характерные для разных степеней острого радиационного язвенного гастроэнтероколита у моногастричных животных после однократного перорального поступления “трехкомпонентных” РЧ.

Данные, представленные в табл. 7, позволяют предложить следующую дозиметрическую шкалу степеней проявления острого радиационного язвенного гастроэнтероколита по диапазонам средних поглощенных доз на слизистую критического отдела ЖКТ (желудка у морских свинок и свиней, толстого отдела кишечника у крыс): для легкой степени у крыс – от 4 до 14 Гр, у морских свинок – от 4 до 13 Гр, у поросят, по совокупности проанализированных признаков радиационного поражения, – от 1 до 5 Гр; для средней степени заболевания у крыс – от 14 до 42 Гр, у морских свинок – от 13 до 39 Гр, у поросят – от 5 до 11 Гр; для тяжелой степени у крыс – от 42 до 57 Гр, у морских свинок – от 39 до 53 Гр, у поросят – от 11 до 21 Гр; для крайне тяжелой степени у крыс – более 57 Гр, у морских свинок – более 53 Гр, у поросят – более 21 Гр. При этом в очагах язвенного поражения локальные дозы могут превышать средние значения примерно в 3 раза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиологические аспекты загрязнения природной среды и аграрных экологических систем радиоактивными частицами нашли отражение в исследованиях ВНИИРАЭ и ряда институтов-соисполнителей на территории СССР, выполненных в 70-е гг. прошлого столетия по вопросам потенциальной опасности для сельского хозяйства радиационных факторов ядерных взрывов. Представленные в настоящей работе результаты экспериментальных исследований, долгие годы являвшихся недоступными для широкой научной общественности, сохраняют актуальность и могут оказаться полезными в задачах радиационной безопасности, связанных с загрязнением окружающей среды радиоактивными частицами различного генезиса. Исходными данными для построения математических моделей транспорта РЧ в ЖКТ животных были экспериментальные материалы, полученные на базе ныне уже не существующего уникального радиологического комплекса ФИЦВиМ, созданного под руководством профессора И.А. Чистякова в начале 70-х годов прошлого столетия в соответствии с решениями правительства страны для оценки последствий воздействия поражающих факторов ядерного взрыва на сельскохозяйственных животных. Санитарным паспортом на технологические системы комплекса регламентирована приемка до 1.11 ТБк/год (30 Ки/год) молодых продуктов ядерного деления, их расфасовка, дистанционная доставка в кормушки животных и на конечном этапе — бездымная утилизация органических радиоактивных материалов. В 80-е годы прошлого столетия эти исследования были признаны потерявшими актуальность и прерваны на полпути. Данное обстоятельство во многом явилось причиной незавершенности радиобиологических исследований, особенно в области дозиметрии излучений инкорпорированных радионуклидов, присутствующих в составе радиоактивных частиц различного генезиса. Если для острой лучевой болезни, вызванной внешним облучением, радиобиологические эффекты анализируются в зависимости от поглощенных доз, являющихся мерой биологического действия ионизирующих излучений, то основная часть исследований последствий внутреннего облучения оперирует терминами поступившей активности того или иного радионуклида. При этом особые сложности в трактовке дозиметрической картины внутреннего облучения возникают в случае перорального и/или ингаляционного поступления “горячих” радиоактивных частиц. Радионуклиды, поступившие в организм в растворимой форме, как правило, гомогенно (или почти гомогенно) распределяются в объеме различных органов и тканей, поэтому разработанные к настоящему времени расчетные коды предполагают равномерное

распределение. Как мы видим из результатов настоящей работы, а также данных, полученных на крупном рогатом скоте и овцах [45, 46], распределение РЧ в содержимом ЖКТ и по площади слизистой оболочки неравномерно, что в конечном итоге приводит к очаговому характеру язвенного гастроэнтероколита. Проведенный анализ дозиметрической, клинической и патологоанатомической картин радиационного воздействия “горячих” РЧ на отделы желудочно-кишечного тракта моногастричных животных позволил определить основные факторы формирования язвенного поражения. К ним следует отнести неравномерное распределение частиц в содержимом отделов ЖКТ, концентрирование РЧ на отдельных участках слизистой оболочки с последующим формированием локальных уровней облучения, превышающих средние значения поглощенных доз более чем в 3 раза. На основании результатов расчета средних поглощенных доз  $\beta$ -облучения слизистой оболочки пищеварительного тракта моногастричных животных была получена дозиметрическая шкала степеней проявления острого радиационного язвенного гастроэнтероколита.

В заключение хотелось бы выразить благодарность и отметить непосредственное участие в проведении настоящей работы профессора Виктора Алексеевича Бударкова, неожиданно для нас ушедшего из жизни в августе 2021 года.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Salbu B., Krekling T., Hove K. et al.* Biological relevance of hot particles ingested by domestic sheep // International Symposium on Environmental Impact of Radioactive Releases. Vienna: IAEA, 1995. P. 312–313.
2. *Aarkrog A.* Manmade radioactivity / Eds E. Van der Stricht, R. Kirchman // Radioecology: Radioactivity and Ecosystems. 2001. P. 55–78.
3. *Dale P., Robertson I., Toner M.* Radioactive particles in dose assessments // J. Environ. Radioac. 2008. V. 99. № 10. P. 1589–1595.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.06.005>
4. Radioactive particles in the Environment: Sources, Particle Characterization and Analytical Techniques // IAEA-TECDOC-1663. V. 1663. Vienna: IAEA, 2011. P. 1–77.
5. *Анненков Б.Н.* Сельское хозяйство после крупных радиационных аварий. Ростов-на-Дону: ЗАО Ростиздат, 2010. 284 с. [*Annenkov B.N.* Selskoe khozyajstvo posle krupnykh radiacionnykh avarij. Rostov-na-Donu: ZAO Rostizdat, 2010. 284 p. (In Russ.)]
6. *Бударков В.А., Zenkin A.S., Kozmin G.V.* Особенности биологического действия искусственных радиоактивных частиц // Сб. мат. междунар. конф. “Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы”. Обнинск.: ВНИИРАЭ, 2018. С. 61–64. [*Budarkov V.A., Zenkin A.S., Kozmin G.V.* Osobennosti

- biologicheskogo dejstviya iskusstvennykh radioaktivnykh chasticz // Sb. mat. mezhdunar. konf. "Radiacionnye tehnologii v selskom khozyajstve i pishhevoj promyshlennosti: sostoyaniye i perspektivy". Obninsk: VNIIRAE, 2018. P. 61–64. (In Russ.)]
7. Бударков В.А., Киришин В.А., Пантелеев Л.И. и др. Методические указания по моделированию воздействия радиационных факторов наземного ядерного взрыва на сельскохозяйственных животных в лабораторных условиях. М.: ГУ МСХ СССР, 1982. 25 с. [Budarkov V.A., Kirshin V.A., Panteleev L.I. i dr. Metodicheskie ukazaniya po modelirovaniyu vozdeystviya radiacionnykh faktorov nazemnogo yadernogo vzryva na selskoxozyajstvennykh zhivotnykh v laboratornykh usloviyakh. Moskva: GU MSX SSSR, 1982. 25 p. (In Russ.)]
  8. Kozmin G.V., Fesenko S., Snegirev A.S. et al. Environmental behaviour of radioactive particles: Transfer to animals // J. Environ. Radioact. 2020. V. 213. P. 106–111. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106111>
  9. Shichijo K., Nariaki Fujimoto N., Uzbekov D. et al. Internal exposure to neutron-activated  $^{56}\text{Mn}$  dioxide powder in Wistar rats. Part 2: pathological effects // Radiat. Environ. Biophys. 2017. V. 56. № 1. P. 55–61. <https://doi.org/10.1007/s00411-016-0676-z>
  10. Stepanenko V. et al. Microdistribution of internal radiation dose in biological tissues exposed to  $^{56}\text{Mn}$  dioxide microparticles // J. Radiat. Res. 2022. V. 63. № 1. P. i21–i25. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrac023>
  11. Stepanenko V. et al. Estimation of "dose-depth" profile in the surface layers of a quartz-containing tile from the former Hiroshima University building indicates the possible presence of beta-irradiation from residual radioactivity after A-bombing // J. Radiat. Res. 2022. V. 63. № 1. P. i54–i60. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrac029>
  12. ICRP Publication 108: Environmental Protection: The Concept and Use of Reference Animals and Plants // Ann. ICRP. 2008. V. 38. № 4. P. 1–251.
  13. Пантелеев Л.И., Анненков Б.Н., Сарapultsev И.А. и др. Теоретические и экспериментальные разработки дозиметрических моделей сельскохозяйственных объектов при радиоактивном загрязнении территорий. Обнинск: ВНИИРАЭ, 1981. 180 с. [Panteleev L.I., Annenkov B.N., Sarapultsev I.A. i dr. Teoreticheskie i eksperimentalnye razrabotki dozimetricheskikh modelei selskoxozyaistvennykh obektov pri radioaktivnom zagryaznenii territorii. Obninsk: VNIIRAE, 1981. 180 p. (In Russ.)]
  14. Целищев С.П. Искусственные радиоактивные частицы для изучения радиационного поражения животных на следе наземного ядерного взрыва в модельных экспериментах // Проблемы животноводства в зоне следа наземного ядерного взрыва / Под ред Б.Н. Анненкова. Обнинск, 1978. С. 29–49. [Celishev S.P. Iskustvennie radioaktivnie chastici dlya izucheniya radiacionnogo porajeniyaivotnih na slede nazemnogo yadernogo vzryva v modelnih eksperimentah // Problemy zhivotnovodstva v zone sleda nazemnogo yadernogo vzryva / Pod red. B.N. Annenкова. Obninsk, 1978. P. 29–49. (In Russ.)]
  15. Куриный В.Д. Моделирование радиоактивных частиц локальных выпадений наземных ядерных взрывов: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1977. 106 с. [Kurinnij V.D. Modelirovanie radioaktivnykh chastits lokalnykh vypadenij nazemny yadernykh vzryvov. [Dissertation]. Moskva, 1977. 106 p. (In Russ.)]
  16. Козьмин Г.В. и др. Принципы моделирования радиоактивных частиц локального следа наземного ядерного взрыва // Докл. конф. ВНИИВВМ. Покров, 1976. [Kozmin G.V. Printsipy modelirovaniya radioaktivnykh chastits lokalnogo sleda nazemnogo yadernogo vzryva // Doklady konf VNIIVVIM. Pokrov, 1976. (In Russ.)]
  17. Bell M.C. Radiation effects on farm animals. Survival of food crops and livestock in the event of nuclear war: Proc of Symposium Brookhaven National Lab // Conf. proc. Oak Rige, 1971. P. 656–669.
  18. Проблемы животноводства в зоне следа наземного ядерного взрыва / Под ред. Б.Н. Анненкова. Обнинск: ВНИИСХРАЭ, 1980. 233 с. [Problemy zhivotnovodstva v zone sleda nazemnogo yadernogo vzryva / Pod red. B. N. Annenкова. Obninsk: VNIISHRAE, 1980. 233 p. (In Russ.)]
  19. Сарapultsev И.А., Козьмин Г.В. и др. Динамика транспорта оплавленных радиоактивных частиц в желудочно-кишечном тракте крыс // Мат. науч. конф., посвященной 60-летию со дня образования СССР. Покров, 1983. С. 9–11. [Sarapultsev I.A., Kozmin G.V. i dr. Dinamika transporta oplavlennykh radioaktivnykh chastits v zheludochno-kishechnom trakte krysa // Materialy nauchnoj konferentsii posvyaschennoj 60 letiyu so dnya obrazovaniya SSSR. Pokrov, 1983. P. 9–11. (In Russ.)]
  20. Сарapultsev И.А., Козьмин Г.В., Бударков В.А. и др. Транспорт оплавленных радиоактивных частиц и дозовые нагрузки в желудочно-кишечном тракте морских свинок при оральном поступлении "3-х компонентных" модельных частиц // Мат. науч. конф., посвященной 60-летию со дня образования СССР. Покров, 1983. С. 13–16. [Sarapultsev I.A., Kozmin G.V., Budarkov V.A. i dr. Transport oplavlennykh radioaktivnykh chastits i dozovye nagruzki v zheludochno-kishechnom trakte morskikh svinok pri oralnom postuplenii "3-h komponentnykh" modelnykh chastits // Materialy nauchnoj konferentsii posvyaschennoj 60 letiyu so dnya obrazovaniya SSSR. Pokrov, 1983. P. 13–16. (In Russ.)]
  21. Сарapultsev И.А., Расин И.М., Козьмин Г.В. Распределение поглощенных доз в желудочно-кишечном тракте свиней при поступлении с кормом оплавленных радиоактивных частиц // Проблемы животноводства в зоне следа наземного ядерного взрыва / Под общ. ред. Б.Н. Анненкова. Обнинск, 1980. С. 203–210. [Sarapultsev I.A., Rasin I.M., Kozmin G.V. Raspredelenie pogloschennykh doz v zheludochno-kishechnom trakte svinej pri postuplenii s kormom oplavlennykh radioaktivnykh chastits // Problemy zhivotnovodstva v zone sleda nazemnogo yadernogo vzryva / Pod obsch. red. B.N. Annenкова. Obninsk, 1980. P. 203–210. (In Russ.)]
  22. Осанов Д.П., Жихтаев И.А. Дозиметрия излучений инкорпорированных радиоактивных веществ. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1977. 200 с.

- [Osanov D.P., Jiihtarev I.A. Dozimetriya izlucheniya inkorporirovannykh radioaktivnykh veshchestv. Izd. 2-e pere-rab i dop. Moskva: Atomizdat, 1977. 200 p. (In Russ.)]
23. Одейчук А.Н. Обобщенный критерий эффективности моделей прогнозирования временных рядов в информационных системах // Бiонiка iнтелекту. 2009. Т. 70. № 1. С. 113–119. [Odejchuk A.N. Obobshhennyj kriterij effektivnosti modelej prognozirovaniya vremennykh ryadov v informacionnykh sistemax // Bionika intelektu. 2009. V. 70. № 1. P. 113–119. (in Russ.)]
  24. Шилова З.В., Шилов О.И. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие. Киров: Изд-во ВГГУ, 2015. 158 с. [Shilova Z.V., Shilov O.I. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika. Uchebnoe posobie. Kirov: Izd-vo VGGU, 2015. 158 p. (in Russ.)]
  25. Агамиров Л. В. Статистические методы анализа результатов научных исследований: учебное пособие по курсам “Методы обработки и представления результатов научных исследований” и “Планирование проведения исследований”. М.: Изд-во МЭИ, 2018. 71 с. [Agamirov L. V. Statisticheskie metody analiza rezultatov nauchnyh issledovanij. Uchebnoe posobie po kursam “metody obrabotki i predstavleniya rezultatov nauchnyh issledovanij” i “planirovanie provedeniya issledovanij”. Moskva: Izd-vo MEI, 2018. 71 p. (in Russ.)]
  26. Osanov D.P. Experimental Validation of a Dosimetric Model of the Gastrointestinal Tract in Cattle // Health Phys. 1974. V. 26. № 6. P. 497–503.
  27. Козьмин Г.В., Спиринов Е.В., Ткаченко В.В. Дозиметрия  $\beta$ -излучения термолуминесцирующим фтористым литием // Радиобиология. 1978. Т. 18. № 5. С. 785–788. [Kozmin G.V., Spirin E.V., Tkachenko V.V. Dozimetriya  $\beta$ -izlucheniya termoluminesiruyuschim fluoristym litiem // Radiobiologiya. 1978. V. 18. № 5. P. 785–788. (in Russ.)]
  28. Hamby D.M. et al. VARSKIN 4: A Computer Code for Skin Contamination Dosimetry // U.S. Nuclear Regulatory Commission. 2011. P. 1–101.
  29. Berger M.J. Distribution of Absorbed Dose Around Point Sources of Electrons and Beta Particles in Water and Other Media // J. Nucl. Med. 1971. V. 12. № 5. P. 5–22.
  30. Сюрдо А.И., Болдеш А.В., Власов М.И. и др. Оценка погрешностей измерения поглощенных доз кожными и глазными дозиметрами с отличающимися толщинами активных и защитных слоев // АНРИ. 2014. Т. 1. № 76. С. 39–45. [Syurdo A.I., Boldesh A.V., Vlasov M.I. i dr. Otsenka pogreshnostej izmereniya pogloshchennykh doz kozhnymi i glaznymi dozimetrami s otlichayuschimisya tolschinami aktivnykh i zaschitnykh sloev // ANRI. 2014. V. 1. № 76. P. 39–45. (in Russ.)]
  31. Ветеринарная радиобиология // Сб. мат. конф. / Под общ. ред. В.А. Бударкова. Покров, 1983. 135 с. [Veterinarnaya radiobiologiya // Sb.mat. konf. / Pod obsch. red. V.A. Budarkova. Pokrov, 1983. 135 p. (in Russ.)]
  32. Rowland M., Tozer T.N. Clinical Pharmacokinetics and Pharmacodynamics: Concepts and Applications. Philadelphia: Wolters Kluwer Health/Lippincott William & Wilkins, 2011. 1267 p.
  33. Sakaguchi E., Itoh H., Uchida S. et al. Comparison of fibre digestion and digesta retention time between rabbits, guinea-pigs, rats and hamsters // Br. J. Nutr. 1987. V. 58. P. 149–158.
  34. De Cuyper A. et al. The uneven weight distribution between predators and prey: comparing gut fill between terrestrial herbivores and carnivores // Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology. 2020. V. 243. P. 110–683.
  35. Stevens C.E., Hume I.D. Contributions of microbes in vertebrate gastrointestinal tract to production and conservation of nutrients // Physiol. Rev. 1998. V. 78. P. 393–427.
  36. Franz R. et al. Intake, selection, digesta retention, digestion and gut fill of two coprophageous species, rabbits (*Oryctolagus cuniculus*) and guinea pigs (*Cavia porcellus*), on a hay-only diet // J. Animal. Physiol. Animal. Nutr. 2011. V. 95. № 5. P. 564–570.
  37. Potkins Z.V., Lawrence T.J., Thomlinson J.R. Effects of structural and non-structural polysaccharides in the diet of the growing pig on gastric emptying rate and rate of passage of digesta to the terminal ileum and through the total gastrointestinal tract // Br. J. Nutr. 1991. V. 65. № 3. P. 391–413.
  38. Partanen K., Jalava T., Valaja J. Effects of a dietary organic acid mixture and of dietary fibre levels on ileal and faecal nutrient apparent digestibility, bacterial nitrogen flow, microbial metabolite concentrations and rate of passage in the digestive tract of pigs // Animal. 2007. V. 1. № 3. P. 389–401.
  39. Wilfart A., Montagne L., Simmins H. et al. Digesta transit in different segments of the gastrointestinal tract of pigs as affected by insoluble fibre supplied by wheat bran // Br. J. Nutr. 2007. V. 98. P. 54–62. <https://doi.org/10.1017/S0007114507692981>
  40. Hoelzel F. The rate of passage of inert materials through the digestive tract // Am. J. Physiol. 1930. V. 92. P. 466–497.
  41. Сарапульцев И.А., Козьмин Г.В., Торубарова А.А., Зенкин А.С. Радиографическое исследование распределения оплавленных радиоактивных частиц в пищеварительном тракте крыс // Сб. мат. конф. Ветеринарная радиобиология. Покров, 1984. С. 10–14. [Sarapulcev I.A., Kozmin G.V., Torubarova A.A., Zenkin A.S. Radiograficheskoe issledovanie raspredeleniya oplavlennykh radioaktivnykh chastic v pishchevaritel'nom trakte krysv // Sb. mat. konf. Veterinarnaya radiobiologiya (Conf. Proc.). Pokrov, 1984. P. 10–14. (In Russ.)]
  42. Shapovalov S., Kozmin G. et al. Damage to the digestive tract of monogastric animals by “hot” radioactive particles // Phys.: Conf. Series. 2020. V. 1701. P. 012026-1–012026-7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1701/1/012026>
  43. Шаповалов С.Г., Зенкин А.С., Бударков В.А., и др. Поражение пищеварительного тракта моногастрических животных “горячими” радиоактивными частицами // Междунар. науч.-практ. конф. “Ядерно-физические исследования и технологии в сельском хозяйстве”. Обнинск, 2020. С. 109–112. [Shapovalov S.G., Zenkin A.S., Budarkov V.A. i dr. Porazhenie pishchevaritelnogo trakta monogastrichnykh zhivotnykh “goryachimi” radioaktivnymi chastitsami //

- Mezhdunarodnaya nauchno prakticheskaya konferentsiya “yadernо fizicheskie issledovaniya i tehnologii v selskom hozyajstve”. Obninsk, 2020. P. 109–112. (in Russ.)]
44. Бударков В.А., Зенкин А.С., Шаповалов С.Г. Симптоматика и течение радиационного язвенного гастроэнтероколита // III Междунар. (XVI Регионал.) науч. конф. “Техногенные системы и экологический риск”. Обнинск, 2020. С. 297–299. [Budarkov V.A., Zenkin A.S., Shapovalov S.G. Symptomatika i techenie radiacionnogo yazvennogo gastroenterokolita // III Mezhdunar. (XVI Regional.) nauch. konf. “Tekhnogennye sistemy i ekologicheskij risk”. (Conference proceedings) Obninsk, 2020. P. 297–299. (In Russ.)]
  45. Козьмин Г.В., Епимахов В.Г. Закономерности поведения радиоактивных частиц в пищевой цепочке и желудочно-кишечном тракте крупного рогатого скота // Радиационная биология. Радиоэкология. 2015. Т. 55. № 5. С. 1–14. [Kozmin G.V., Epimachov V.G. Zakonomernosti povedeniya radioaktivnykh chastits v pischevoj tsepochke i zheludochno kishechnom trakte krupnogo rogatogo skota // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. 2015. V. 55. № 5. P. 1–14. (in Russ.)]
  46. Козьмин Г.В., Епимахов В.Г., Снегирев А.С. и др. Транспорт радиоактивных частиц в желудочно-кишечном тракте овец // Радиационная биология. Радиоэкология. 2018. Т. 58. № 3. С. 305–318. [Kozmin G.V., Epimachov V.G., Snegiryov A.S. i dr. Transport radioaktivnykh chasticz v zheludochno-kishechnom trakte ovecz // Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya. 2018, V. 58. № 3. P. 305–318. (in Russ.)] <https://doi.org/10.7868/S0869803118030104>

## Dosimetric Indicators of Damage to the Digestive Tract of Monogastric Animals by Incorporated Radioactive Particles

S. G. Shapovalov<sup>a,#</sup> and G. V. Kozmin<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

<sup>#</sup>E-mail: shapovalovstanislav93@gmail.com

The analysis of dosimetric parameters of internal irradiation and biological effects in monogastric animals (rats, guinea pigs, pigs) caused by orally received “hot” radioactive particles causing ulcerative necrotic lesions of the gastrointestinal tract is presented. Mathematical models of particle transport and formation of absorbed doses in the digestive tract have been developed. The features of the deep distribution of absorbed doses in the mucous membrane depending on the spectral characteristics of  $\beta$ -radiation of radionuclides that are part of silicate particles are given. It is shown that the main factors in the formation of ulcerative lesions of the digestive tract were the uneven distribution of particles in the contents and the concentration of particles in certain areas of the mucous membrane, followed by the formation of high local dose loads. A dosimetric scale of extremely severe, severe, medium and mild acute radiation ulcerative gastroenterocolitis is proposed, which allows extrapolating the results of model experiments on scenarios of radioactive contamination of the environment by particles of various genesis. The results obtained can be taken into account in the tasks of radiation safety.

**Keywords:** hot radioactive particles, internal exposure, biological effect, digestive tract, monogastric animals, rats, guinea pigs, pigs, absorbed dose, acute radiation ulcerative gastroenterocolitis