

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ «ГОРЯЧИХ» РАДИОАКТИВНЫХ ЧАСТИЦ НА ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНЫЙ ТРАКТ МОНОГАСТРИЧНЫХ ЖИВОТНЫХ

BIOLOGICAL EFFECT OF “HOT” RADIOACTIVE PARTICLES ON THE GASTROINTESTINAL TRACT OF MONOGASTRIC ANIMALS

**S. Shapovalov
G. Kozmin**

Summary. The main dosimetric characteristics of β -irradiation of the gastrointestinal tract (GIT) of monogastric animals (for example, rats, guinea pigs and pigs), leading to biological effects in the form of radiation-induced ulcerative necrotic lesions of the digestive tract with oral intake of insoluble “hot” radioactive particles (RP), are presented. The main factors leading to the formation and further development of such ulcerative radiation lesions are the uneven distribution of RP in the contents of the gastrointestinal tract, as well as the deposition of such particles on individual sections of the surface layer of the mucous membrane, which subsequently leads to the formation of local radiation levels that can exceed the average values of the formed absorbed doses. According to the results of the analysis of clinical manifestations of the effects of exposure to radioactive radiation, together with a pathoanatomical assessment of the process of formation of focal ulcerative lesions, the observed pathological process was classified as acute radiation ulcerative gastroenterocolitis ranked by mild, medium, severe and extremely severe degrees in strict dependence on the activity values of “hot” RP incorporated in the gastrointestinal tract and absorbed doses of β -radiation formed in the digestive tract experimental animals.

Acknowledgments: the authors of the article express their gratitude to Professors Viktor Alekseevich Budakov and Alexander Sergeevich Zenkin for providing indicators of the course of the disease, a pathoanatomic picture of radiation damage to the digestive tract and valuable comments

Keywords: biological effect, digestive tract, monogastric animals, rats, guinea pigs, pigs, hot radioactive particles, absorbed doses, acute radiation ulcerative gastroenterocolitis,.

Шаповалов Станислав Геннадьевич

Соискатель, младший научный сотрудник,
Всероссийский научно-исследовательский институт
радиологии и агроэкологии

Козьмин Геннадий Васильевич

Кандидат биологических наук, доцент,
Всероссийский научно-исследовательский институт
радиологии и агроэкологии, Обнинск
rira70@yandex.ru

Аннотация. Представлены основные дозиметрические характеристики β -облучения отделов желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) моногастричных животных (на примере крыс, морских свинок и свиней), приводящие к возникновению биологических эффектов в виде радиационно-индуцированных язвенно-некротических поражений пищеварительного тракта при пероральном поступлении труднорастворимых «горячих» радиоактивных частиц (РЧ). В качестве основных факторов, приводящих к формированию и дальнейшему развитию подобных язвенных радиационных поражений, выступают неравномерность распределения РЧ в содержимом отделов ЖКТ, а также осаждение таких частиц на отдельно взятых участках поверхностного слоя слизистой оболочки, что впоследствии приводит к формированию локальных уровней облучения, которые более чем в 3 раза могут превышать средние значения сформированных поглощённых доз. По результатам анализа клинических проявлений последствий воздействия радиоактивного излучения совместно с патологоанатомической оценкой процесса образования очаговых язвенных поражений наблюдаемый патологический процесс классифицировали как острый радиационный язвенный гастроэнтероколит ранжированный на легкую, среднюю, тяжелую и крайне тяжелую степени в строгой зависимости от величин активности инкорпорированных в ЖКТ «горячих» РЧ и поглощённых доз β -излучения, сформированных в пищеварительном тракте экспериментальных животных.

Благодарности: авторы статьи выражают благодарность профессорам Виктору Алексеичу Бударкову и Александру Сергеевичу Зенкину за предоставление показателей течения болезни, патологоанатомической картины радиационного поражения пищеварительного тракта и ценные замечания.

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

Введение

Исследования биологического действия высоко-радиоактивных микроскопических источников ионизирующего излучения — «горячих» радиоактивных частиц (РЧ) различного генезиса в настоящее время являются весьма актуальным направлением для радиобиологии. Труднорастворимые РЧ с различным радионуклидным составом могут образовываться как в следствие радиационных аварий и ядерных взрывах, так и в результате радиоактивных выбросов и сбросов предприятий атомной промышленности эксплуатирующийся в штатном режиме [1–4]. Попадая в окружающую среду такие РЧ могут выступать в качестве фактора радиационного риска не только для человека, но и для сельскохозяйственных и домашних животных.

В ряде экспериментов, проводившихся на сельскохозяйственных и лабораторных животных, было установлено, что в результате перорального инкорпорирования в организм животных продуктов ядерного деления (ПЯД) в виде растворимых веществ и в виде труднорастворимых частиц с соизмеримыми величинами активностей, именно последние из них обладают более ярко выраженным биологическим действием, специфика которого проявляется в виде очаговых радиационных язвенно-некротических поражений пищеварительного тракта различной степени тяжести [5–7].

В связи с вышеописанными обстоятельствами целью настоящего исследования явилось изучение биологического действия β -излучения от инкорпорированных в пищеварительный тракт моногастричных животных (крыс, морских свинок и свиней) «горячих» РЧ, опираясь на результаты анализа дозиметрической, клинической и патологоанатомической картин радиационного воздействия таких частиц. Очень важно отметить, что моногастричные животные, использованные в настоящем исследовании, могут рассматриваться в качестве референтных организмов для оценки потенциальной опасности радиационного воздействия на мелких и крупных млекопитающих [8].

Материалы и методы

Биологическое действие труднорастворимых «горячих» РЧ, имитирующих локальные выпадения наземных ядерных взрывов, изучали на лабораторных грызунах обоего пола — крысах линии «Вистар» (*Rattus sp. strain Wistar*) массой 200–300 г, беспородных морских свинок (*Cavia porcellus*) массой 400–600 г, а также на сельскохозяйственных животных — поросятах домашних свиней (*Sus domesticus*) крупной белой породы возрастом 2–2,5 месяца и массой от 25 до 30 кг, благополучных по инфекционным и инвазионным заболеваниям. Ори-

ентируясь на показатели масса тела, общее физическое состояние, а также на пол и возраст экспериментальных животных из них формировали подопытные и контрольные группы. В среднем каждая группа состояла из 5–10 лабораторных животных и 2–3 поросят. Со всеми животными обращались в соответствии с руководящими принципами исследований на экспериментальных животных [9].

В рамках настоящих экспериментальных исследований в качестве частиц, имитирующих локальные выпадения наземных ядерных взрывов, использовали труднорастворимые РЧ «трехкомпонентной», «урановой» и «рениевой» моделей, представляющие собой стеклосферы диаметром от 80 до 160 мкм, активированные в потоке тепловых нейтронов. «Урановая» модель представляла собой полидисперсные стеклосферы, на поверхность которых до нейтронной активации наносилась соль ^{235}U (уранил $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). РЧ «трехкомпонентной» модели содержали в своей силикатной матрице набор радионуклидов в следующем соотношении: ^{165}Dy (42%), ^{142}Pr (45%) и ^{90}Y (13%). В силикатные матрицы РЧ «рениевой» модели были вплавлены радионуклиды рения ^{186}Re и ^{188}Re . Способность «трехкомпонентных» и «рениевых» РЧ растворяться в кислотах и щелочах не превышала 1–2%. Для «урановых» РЧ данный показатель не превышал 5%. Активность модельных РЧ, перорально поступивших в пищеварительный тракт экспериментальных животных с кормом, варьировалась от 100 до 1500 МБк/кг (на 1 кг массы тела животного) [10].

В экспериментах на лабораторных животных модельные РЧ взвешивали путем барботирования в 2,5%-ом геле на основе картофельного крахмала. Рассчитанные количества РЧ вводили грызунам внутривентриально при помощи шприца через металлический зонд. На одно лабораторное животное приходилось около 2,5–3 мл геля, содержащего модельные РЧ. При помощи дозиметрического прибора ДРГЗ-03 контролировали процесс поступления РЧ в организм крыс и морских свинок, проводя измерения мощности дозы тормозного и γ излучения в области расположения желудка до и после введения геля с РЧ. [11,12]. В экспериментах на поросятах известное количество РЧ помещали в кормушку со 100 г-ми комбикорма, которую устанавливали в индивидуальной обменной клетке. Потребление поросятами корма, содержащего РЧ, контролировали путем измерения показателей мощности дозы от излучения кормушки до и после скармливания содержимого [13].

В процессе проведения исследований осуществлялся регулярный сбор выделенных фекалий с последующим взвешиванием и отбором средних проб

для каждой особи. После умерщвления животных осуществляли препарирование пищеварительного тракта с предварительным лигированием каждого из структурных отделов. На следующем этапе осуществляли раздельное взвешивание желудка, тонкого и толстого отделов кишечника (с содержимым и без него) после чего отбирали средние пробы содержимого отделов и фрагментов их стенок.

Оценку биокинетических транспортных характеристик модельных РЧ, инкорпорированных в ЖКТ экспериментальных животных, проводили при помощи компартментального анализа [14]. Полное описание данной методики представлено в работе [15] авторов настоящего исследования.

Для наиболее точной оценки величин поглощенных доз β -излучения, вызвавших радиационно-индуцированное язвенное поражение отделов ЖКТ животных, выполняли следующие процедуры. Во-первых, на основании предположения о гомогенном распределении РЧ в пищеварительном тракте и геометрии облучения (2л или 4л), с помощью разработанных нами компартментальных моделей [15] определяли величины средних поглощенных доз β -облучения поверхности слизистой оболочки отделов ЖКТ. Во-вторых, проводилась оценка поглощенных доз в областях наибольшего концентрирования РЧ на основании данных прямых измерений мощностей поглощенных доз на внутренней поверхности слизистой оболочки и результатов автордиографических исследований. Наряду с этим оценивались показатель неравномерности облучения слизистой оболочки (P_{max}/P_{min}) и максимально возможная кратность превышения средних уровней облучения ($P_{max}/P_{сред}$). На конечном этапе дозиметрические параметры сопоставляли с патологоанатомической картиной язвенно-некротических поражений слизистой оболочки с установлением дозовых диапазонов характерных для определенных поражений слизистой оболочки.

С использованием методики, представленной в [15], были проведены расчеты средних мощностей поглощенных доз β -излучения (выражение 1) на поверхности слизистой оболочки отделов ЖКТ крыс, морских свинок и свиней в предположении о гомогенном распределении РЧ в пищеварительном тракте.

$$\overline{P}_i(t) = 2,88 \cdot 10^{-5} \cdot C_i(t - \tau) \cdot \overline{E}_\beta(t) \cdot \eta(t), \quad (1)$$

где:

$\overline{P}_i(t)$ – средняя мощность поглощенной дозы β -излучения в i -м отделе ЖКТ животных ($i=1$ — желудок, $i=2$ — тонкий отдел кишечника, $i=3$ — толстый отдел кишечника), кГр/ч;

$2,88 \cdot 10^{-5}$ — коэффициент, учитывающий размерность и геометрию облучения. Принято, что β -облучение слизистой оболочки желудка и толстого отдела кишечника происходит в 2л- геометрии, а β -облучение тонкого отдела кишечника в 4л- геометрии;

$C_i(t-\tau) = q_i(t-\tau)/m_i$ — удельная массовая активность ПЯД в содержимом i -ого отдела ЖКТ, Бк/г;

τ — время задержки выведения РЧ из желудка свиней. При $t < \tau = 2$ ч $q_1(t-\tau) = q_0$ (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 β -излучения ПЯД, МэВ;

$\eta(t)$ — функция, учитывающая радиоактивный распад, отн. ед.

Расчет величин средних поглощенных дозы β -излучения осуществляли путем интегрирования выражения (1) по времени от 0 (момент однократного поступления РЧ) до некоторого значения времени t , характеризующего динамику формирования средних поглощенных доз.

Картину распределения поглощенных доз в желудке животных удалось получить экспериментальным путем при помощи методов термолюминесцентной дозиметрии (ТЛД) и автордиографии. Термолюминесцентные детекторы на основе порошкообразного и таблетированного фторида лития (LiF) использовали в экспериментах на поросятах для измерения мощностей поглощенных доз β -излучения на поверхности слизистой оболочки желудка. Для этой цели после умерщвления животного его желудок немедленно замораживали при помощи жидкого азота, чтобы минимизировать перераспределение РЧ в его содержимом. После полной заморозки желудка его стенку размораживали, отделяли от содержимого и помещали наборы ТЛД между стенкой и замороженным содержимым для экспонирования детекторов.

Метод автордиографии применялся в экспериментах на лабораторных крысах для установления качественной картины распределения инертных РЧ в содержимом их желудков. Для этого, как и в случае для поросят, желудки крыс вместе с содержимым замораживали при температуре -60 °С. После замораживания желудка крыс, разрезанные продольно на две равные части, накладывали в темной комнате на рентгеновскую пленку (РМ-1) и экспонировали 5–30 минут с последующим проявлением.

В процессе изучения биологического действия на организм животных труднорастворимых РЧ, инкорпорированных в пищеварительный тракт, определяли такие показатели как [7]: общее состояние экспериментальных животных (наличие подвижности, угнетенно-

Таблица 1. Оценка степени радиационно-индуцированного поражения пищеварительного тракта экспериментальных животных

Стадия	Клинические проявления
Начальная стадия развития язв	Слизистая оболочка гиперемирована с геморрагиями
Развитая язва	Края язвы приподняты, отечны, дно розовато-серого цвета, в отдельных случаях покрыто мягкой грязной, бесструктурной массой тканевого раствора
Прободная язва	Очаговый некроз с полным распадом не только слизистой, но и мышечной и серозной оболочек
Язва в стадии заживления	Края и дно язвы покрыты грануляциями ярко-красного цвета
Зажившая язва	Образование на месте язвы соединительно-тканного рубца

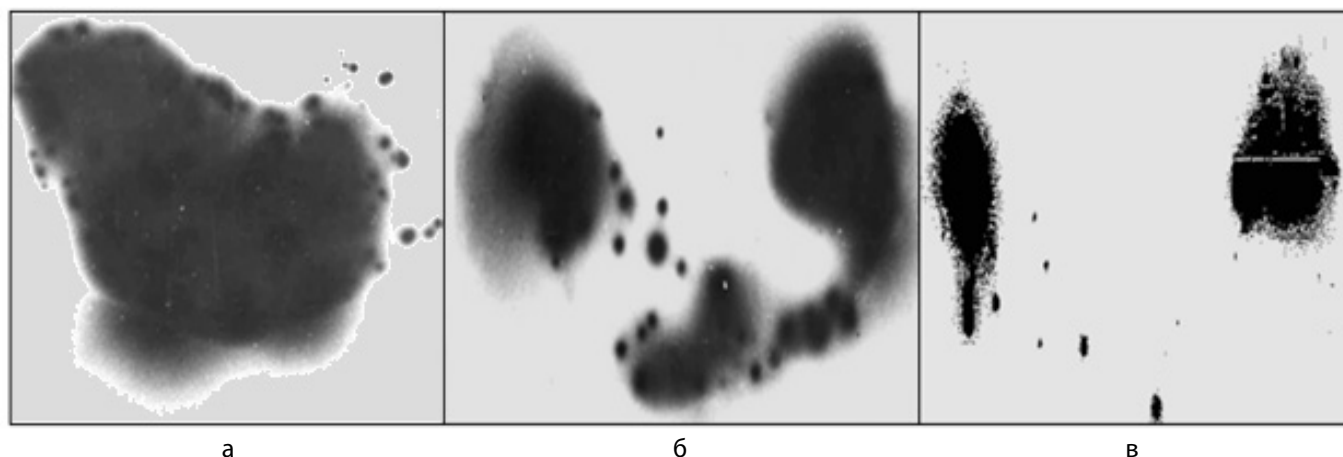


Рис. 1. Авторадиограммы желудков крыс через 1 (а), 3 (б) и 6 (в) часов после внутрижелудочного введения РЧ [17]

сти, возбужденности, агрессивности или пугливости); внешнее состояние шерстного покрова (наличие взъерошенности шерсти и очагов алопеции) и кожи (наличие кровоизлияний, отечности и т.п.); состояние видимых слизистых оболочек ротовой полости и глаз (наличие на слизистых бледности, покраснений, синюшности, набуханий, кровоизлияний или эрозий, а также наличие выделений и их характер); состояние органов дыхания, наличие и характер выделений из носа, наличие кашля; в фекалиях выявляли примеси скрытой крови. Клинические показатели проявления радиационного поражения, динамику изменения массы тела, выживаемость, гематологическую и патологоанатомическую картины у лабораторных грызунов исследовали после однократного перорального внутрижелудочного введения модельных РЧ с удельной активностью от 100 до 1850 МБк/кг массы тела [7], а у поросят после однократного перорального поступления с кормом РЧ с удельной активностью 370 и 740 МБк/кг массы поросенка [10]. Оценка процесса образования радиационных язвенных поражений осуществляли в начальный период их развития (2–5 сут.), в период яркого проявления клинических симптомов (10–15 сут.) и в течение

заживления язв (15–30 сут. для выживших животных). Для того, чтобы наиболее достоверно оценить каждый из периодов умерщвляли по 3–5 животных на каждый отдельно взятый период. Соотнесение стадий трансформации язвенной патологии с основными сопутствующими клиническими симптомами представлено в таблице 1.

Результаты исследований

Как уже было указано выше, величины поглощённых доз β -облучения поверхностного слоя слизистой оболочки отделов пищеварительного тракта определяли с использованием методики камерного (компарментального) анализа путем построения моделей транспорта частиц в ЖКТ животных в геометрии гомогенного распределения частиц в содержимом отделов. Данный подход наиболее широко используется в задачах, связанных с пероральной инкорпорацией в организм животных радиоактивных веществ в растворимом виде [16]. В случаях же, когда в организм животных пероральным путем попадают радионуклиды в виде труднорастворимых РЧ, их распределение в содер-

Таблица 2. Диапазоны мощностей поглощенных доз β -облучения слизистой оболочки желудка поросёнка, получившего однократно с кормом 370 МБк/кг «трехкомпонентных» ОРЧ

ΔP , сГр/ч	$P_{ср}$ сГр/ч	Количество заложённых детекторов	Облучаемая площадь стенки в%
6–25	13±5	12	15
26–44	31±4	36	46
45–63	51±6	20	25
64–82	75±8	6	8
83–100	92±12	2	3
101–120	110±14	2	3

жимом, строго говоря, не является равномерным [10]. Учитывая данное обстоятельство, следует отметить, что величины мощностей доз и поглощенных доз, полученные путем численного интегрирования выражения (1), соотносятся с реальной дозиметрической картиной с достаточной долей условности. В связи с вышеперечисленными обстоятельствами возникает необходимость в изучении неравномерности внутреннего облучения отделов ЖКТ и сравнения средних измеренных мощностей доз с величинами мощности поглощённой дозы, вычисленных с помощью уравнения (1). Экспериментальное подтверждение неравномерности распределения труднорастворимых РЧ в пищеварительном тракте было получено в опытах на крысах с использованием метода автордиографии. На рисунке 1 представлены проявленные автордиограммы желудков крыс через 1, 3 и 6 часов после инкорпорирования РЧ.

Из рисунка 1 видно, что по истечению 3-х часов (рисунок 1б) после введения РЧ первоначальное равномерное распределение РЧ в содержимом желудка (рисунок 1а) меняется на распределение со склонностью к накоплению РЧ в кардиальной (*pars cardiaca*) и пилорической (*pars pylorica*) частях желудка. По истечению 6-ти часов данная тенденция становится еще более заметной (рисунок 1в). Именно в кардиальной и пилорической частях желудка крыс были отмечены наиболее ярко выраженные язвенно-некротические поражения слизистой оболочки. К депонированию инертных РЧ в кардиальной части желудка, по всей видимости, проводит деятельность кольцевого гастроэзофагального сфинктера (*ostium cardiacum*), не позволяющего кормовой масса попасть обратно в пищевод. Другой сфинктер, который соединяет желудок с двенадцатиперстной кишкой, способствует удержанию частиц в пилорическом отделе желудка (в привратнике (*pylorus*)), обладающем наиболее глубокими желудочными ямками, по всей видимости, депонирующими РЧ. Еще одной причиной, по которой РЧ могут депонироваться на поверхности слизистой желудка считается процесс гравитационного осаждения силикатных РЧ поскольку их физическая плотность заметно превышает плотность химуса [18].

Оценку количественной картины неравномерности распределения сформированных мощностей доз β -излучения получили с помощью LiF детекторов, которые помещали под стенку предварительно замороженного желудка поросенка (таблица 2).

Из таблицы 2 видно, что мощность дозы, усредненная по всей поверхности слизистой оболочки желудка (т.е. по всем детекторам), составляет 37 ± 6 сГр/ч. Данное значение согласуется со значением, которое было получено расчетным путем для случая гомогенного распределения частиц в содержимом желудка и 2л-геометрии облучения ($41,0$ сГр/ч). Показатель неравномерности распределения измеренных мощностей поглощённых доз — (P_{max}/P_{min}) в данном случае достигает 20. Также из таблицы 2 можно заметить, что показатель кратности превышения максимальным значением среднего значения — $(P_{max}/P_{ср})$ достигает 3-х раз. Полученные экспериментальные результаты указывают на то, что ~70% площади внутренней поверхности слизистой оболочки желудка поросенка облучается средними дозами, а на ~13% приходятся максимальные доз, как раз на тех участках слизистой оболочки, где наблюдались наиболее существенные очаги язвенно-некротических поражений (кардиальная и пилорическая части).

Основываясь на результатах всестороннего анализа повреждений отделов пищеварительного тракта, развития и исхода радиационно-индуцированного поражения организма лабораторных грызунов В.А. Киршиным, В.А. Бударковым и А.С. Зенкиным, исходя из величин поступившей активности модельных РЧ, были выделены следующие ниже представленные 4 степени острого радиационного язвенного гастроэнтероколита [7].

Крайне тяжелая степень характеризовалась тем, что болезнь протекала очень быстро. Начальный период и разгар заболевания происходили практически одновременно. Очень быстро начинали проявляться первые признаки лучевого поражения, а именно крайне угнетенное общее состояние, минимизация двигательной активности, отсутствие реакций на внешние

Таблица 3. Степени проявления острого радиационного язвенного гастроэнтероколита в зависимости от величин поступивших активностей и поглощённых доз, сформированных в соответствующем отделе ЖКТ

Форма болезни	Удельная активность РЧ, МБк/кг	Вид	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	38,5–52,5	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

раздражители и потеря аппетита. Отмечалось существенное снижение массы тела, взъерошенность шерстного покрова, приступы диареи с примесью крови в кале, воспаление и отек слизистой оболочки ануса. В ходе патологоанатомических исследований выявлялись признаки пневмонии, острого геморрагического гастроэнтероколита, а также дистрофические изменения почек, печени, атрофия селезенки. Летальные исходы наблюдались в 100%-х случаев. Крысы погибали через 4–6, морские свинки через 6–10, а поросята через 8–12 суток после первого поступления модельных РЧ. У крыс, погибавших раньше остальных экспериментальных животных, на слизистых оболочках отмечали наличие гиперемии и геморрагии, при этом серьезные изъязвления в ЖКТ, как правило, даже не успевали развиться. У морских свинок и поросят радиационно-индуцированные язвенно-некротические поражения слизистой оболочки ЖКТ отмечались всего через пару суток с момента инкорпорации РЧ.

Тяжелая степень заболевания протекает более замедленно по сравнению с крайне тяжелой степенью. Наблюдалось угнетение общего состояния, понижение аппетита, массы тела, адинамия, выпадение шерсти, учащение мочеиспускания, воспаления и отеки слизистой оболочки ануса, а также частые приступы диареи с примесью крови в кале. На начальном этапе развития болезни (на 2–5-е сутки) на слизистых оболочках желудка и толстого отдела кишечника обнаруживали гиперемированные участки. В период разгара заболевания (на 6–20-е сутки) на этих же участках слизистой оболочки проявлялись язвенно-некротические поражения. Для периода разгара заболевания характерно наличие дистрофических изменения почек, печени и незначительное уменьшение селезенки. Летальные

исходы у крыс наступали на 2-й, у морских свинок на 3–4-й, а у свиней на 4–5-й неделе после однократного поступления труднорастворимых РЧ. Показатель смертности варьировался от 40 до 80%).

Средняя степень заболевания характеризуется тем, что клиническая картина чаще всего проявляется в те же сроки, что и при тяжелой степени болезни. При этом отмечается большая часть симптомов свойственных тяжелой степени с той разницей, что развиваются они более медленно, а степень их выраженности значительно слабее. Гистологические исследования показывали, что слизистая оболочка истончена, слизистые железы атрофированы, а их клетки пикнотичны. Строма обеднена клеточными элементами. Смертность при средней степени варьировалась от 30 до 40%. По истечении 2-х (крысы) и 3-х (морские свинки) недель после инкорпорирования РЧ у выживших животных начинался период восстановления. Патологоанатомические исследования позволяли обнаружить признаки радиационного гастроэнтероколита с образованием язвенно-некротических очагов. У выживших животных места заживающих язвенных поражений были покрыты рубцовой тканью, как, например, у поросят, выживших спустя 2 месяца с момента поступления РЧ и умерщвленных на 62-е и 69-е сутки. В кишечнике также отмечались признаки восстановления слизистой оболочки, частичное восстановление покровного эпителия и постепенная регенерация стромы.

Легкая степень характеризовалась тем, что болезнь протекала без ярко выраженных клинических симптомов и существенных изменений масса тела с кратковременным снижением пищевой возбудимости и двигательной активности. При патологоанатомическом

вскрытии обнаруживали признаки острого гастрита (до 15–20 суток) в подавляющем большинстве случаев без образования тяжелых изъязвлений. Выживаемость животных составляла 100%.

После проведения оценки нижней границы средних поглощённых доз в желудке, было установлено, что средние дозы β -излучения, приводящие к возникновению язвенных поражений, составляют ~ 10 Гр у поросят, ~ 14 Гр у крыс и ~18 Гр у морских свинок. Полулетальные дозы за 30 дней — ($LD_{50/30}$) после однократного инкорпорирования РЧ для желудка морских свинок составляли ~45 Гр. Аналогичный показатель летальности, но за 60 дней — ($LD_{50/60}$) также для желудка морских свинок составил ~37 Гр. Полученные величины средних поглощённых доз соответствуют пероральному инкорпорированию модельных РЧ со следующими величинами активности, нормированными на единицу массы животных — 1326 МБк/кг (для оценки $LD_{50/30}$) и 1058 МБк/кг (для оценки $LD_{50/60}$). У поросят формирование средних поглощённых доз облучения ЖКТ ~10 Гр могло привести к летальному исходу. В таблице 3 приведены величины активностей и средних поглощённых доз, характерных для каждой из степеней проявления острого радиационного язвенного гастроэнтероколита.

На основании данных, приведенных в таблице 3, представляется возможным предложить следующую дозиметрическую шкалу степеней проявления острого радиационного язвенного гастроэнтероколита по диапазонам (или величинам в случае для свиней) средних поглощённых доз β -облучения поверхностного слоя слизистой оболочки критического отдела ЖКТ (желуд-

ка у морских свинок и свиней и 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. Вместе с этим величины локальных доз в местах очаговых язвенных поражений способны превышать средние значения до 3-х раз.

Заключение

Биологический эффект от инкорпорации в ЖКТ моногастричных животных труднорастворимых «горячих» РЧ проявляется развитием острого радиационного язвенного гастроэнтероколита, который представляет собой патологическое состояние, существенно отличающееся от описанной в литературе кишечной формы острой лучевой болезни (ОЛБ) наличием очаговых язвенных поражений пищеварительного тракта. В зависимости от величин сформированных поглощённых доз β -облучения поверхностного слоя слизистой оболочки отделов ЖКТ экспериментальных животных выделены 4 степени проявления острого радиационного язвенного гастроэнтероколита, ранжированные по диапазонам средних поглощённых доз облучения слизистой оболочки критического отдела ЖКТ, отличающиеся характером радиационных повреждений ЖКТ, развитием и исходом радиационного поражения организма животных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Salbu, B. Biological relevance of hot particles ingested by domestic sheep / B. Salbu, T. Krekling and K. Hove // International Symposium on Environmental Impact of Radioactive Releases, Vienna: IAEA. — 1995. — P. 312–313.
2. Steinhäuser, G. Anthropogenic radioactive particles in the environment / G. Steinhäuser // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. — 2018. — Vol. 318. — № 3. — P. 1629–1639.
3. Dale, P. Radioactive particles in dose assessments / P. Dale, I. Robertson, M. Toner // Journal of environmental radioactivity. — 2008. — Vol. 99. — № 10. — P. 1589–1595.
4. Radioactive particles in the Environment: Sources, Particle Characterization and Analytical Techniques // IAEA-TECDOC Vienna. — 2011. — Vol. 1663. — 77 p.
5. Анненков, Б.Н. Сельское хозяйство после крупных радиационных аварий / Б.Н. Анненков // Ростов-на-Дону: ЗАО Ростиздат. — 2010. — 284 с.
6. Kozmin, G.V. Environmental behaviour of radioactive particles: Transfer to animals / G.V. Kozmin, S. Fesenko, A.S. Snegirev, N.I. Sanzharova, Yu.A. Kurachenko // Journal of Environmental Radioactivity. — 2020. — Vol. 213. — 11 p.
7. Ветеринарная радиобиология / Сб. мат. конф. Под ред. В.А. Бударкова, О.Н. Карпова, А.А. Торубаровой // Покров: ВНИИВВиМ — 1983. — 135 с.
8. ICRP Publication 108: Environmental Protection: The Concept and Use of Reference Animals and Plants // Ann. ICRP. — 2008. — Vol. 38. — № 4. — 251 p.
9. Приказ министерства здравоохранения СССР № 755 от 12 августа 1977 «О мерах по дальнейшему совершенствованию организационных форм работы с использованием экспериментальных животных» // МЗ СССР. — 1977. — 7 с.
10. Пантелеев, Л.И. Теоретические и экспериментальные разработки дозиметрических моделей сельскохозяйственных объектов при радиоактивном загрязнении территорий. / Л.И. Пантелеев, Б.Н. Анненков, И.А. Сарапульцев и др. // — Обнинск: ВНИИЭСР. — 1981. — 180 с.
11. Сарапульцев, И.А. Динамика транспорта оплавленных радиоактивных частиц в желудочно-кишечном тракте крыс / И.А. Сарапульцев, Г.В. Козьмин и др. // В сб. Ветеринарная радиобиология. Под ред. В.А. Бударкова, О.Н. Карпова, А.А. Торубаровой. — Покров: ВНИИВВиМ. — 1983. — С. 9–11.

12. Сарапульцев, И.А. Транспорт оплавленных радиоактивных частиц и дозовые нагрузки в желудочно-кишечном тракте морских свинок при оральном поступлении «3-х компонентных» модельных частиц / И.А. Сарапульцев, Г.В. Козьмин, В.А. Бударков и др. // В сб. Ветеринарная радиобиология. Под ред. В.А. Бударкова, О.Н. Карпова, А.А. Торубаровой. — Покров: ВНИИВВиМ. — 1983. — С. 13–16.
13. Сарапульцев, И.А. Распределение поглощенных доз в желудочно-кишечном тракте свиней при поступлении с кормом оплавленных радиоактивных частиц / И.А. Сарапульцев, И.М. Расин, Г.В. Козьмин // В сб.: Проблемы животноводства в зоне следа наземного ядерного взрыва. Под общ. ред. Б.Н. Анненкова. — Обнинск: ВНИИСХР. — 1980. — С. 203–210.
14. Осанов, Д.П. Дозиметрия излучений инкорпорированных радиоактивных веществ. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Д.П. Осанов, И.А. Лихтарев — Москва: Атомиздат. — 1977. — 200 с.
15. Shapovalov, S. Radioactive particles: biokinetic transfer parameters in the git of monogastric animals / S. Shapovalov, G. Kozmin, E. Denisova, Y. Kurachenko, S. Fesenko, A. Zenkin // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — P. 012025.
16. Osanov, D.P. Experimental validation of a dosimetric model of the gastrointestinal tract in cattle / D.P. Osanov, B.S. Prister, Y.P. Panova, G.G. Ryabov, N.I. Burov, A.I. Shaks // Health Physics. — 1974. Vol. 26. — P. 497–503.
17. Сарапульцев, И.А. Радиографическое исследование распределения оплавленных радиоактивных частиц в пищеварительном тракте крыс / И.А. Сарапульцев, Г.В. Козьмин, А.А. Торубарова, А.С. Зенкин // В сб. Ветеринарная радиобиология. Под ред. В.А. Бударкова, О.Н. Карпова, А.А. Торубаровой. — Покров: ВНИИВВиМ. — 1984. — С. 10–14.
18. Hoelzel, F. The rate of passage of inert materials through the digestive tract / F. Hoelzel // American Journal of Physiology. — 1930. — Vol. 92. — P. 466–497.

© Шаповалов Станислав Геннадьевич, Козьмин Геннадий Васильевич (girae70@yandex.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»