

Дозы на весь организм и их неопределенность при облучении мышей на гамма-радиобиологической установке ИГУР-1М

В экспериментальном отделе ФГБУН УНПЦ РМ ФМБА России выполняются радиобиологические исследования с использованием гамма-установки ИГУР-1М. В работе проведен численный эксперимент для уточнения дозы облучения экспериментальных мышей и соответствующие неопределенности. Определены коэффициенты перехода от дозы в воздухе, измеренной ионизационной камерой, к дозе на организм мыши в зависимости от высоты размещения клетки с животными. Относительные стандартные неопределенности доз облучения для мышей в возрасте до 7 дней не превышают 7%. Для более подвижных особей старшего возраста неопределенность доставляемых доз облучения может достигать 10%.

Ключевые слова: ИГУР-1М, доза облучения, неопределенность, численный эксперимент.

Е.А.Шишкина^{1,2},
Н.И.Атаманюк^{1,2},
А.А.Перетыкин¹, Е.А.Пряхин¹

¹ ФГБУН УНПЦ РМ ФМБА России, г. Челябинск

² ФГБОУ ВО ЧелГУ, г. Челябинск

Выполнение работ с лабораторными животными занимает важное место в экспериментальной радиобиологии, позволяет получать в контролируемых условиях эксперимента данные о влиянии ионизирующего излучения на широкий спектр биологических показателей. В России число экспериментальных радиобиологических установок крайне невелико. ФГБУН Уральский научно-практический центр радиационной медицины ФМБА России (УНПЦ РМ), г. Челябинск, эксплуатирует исследовательскую гамма-установку радиобиологическую ИГУР-1М (изготовитель ЗАО «Квант», г. Екатеринбург), оснащенную четырьмя источниками типа ИГИ-Ц-9 (¹³⁷Cs). Установка используется для облучения различных биологических объектов: суспензии клеток человека

для экспериментов *in vitro*, культуры водорослей [1], дрозофил [2], растений [3], лабораторных мышей [4].

Чаще всего в эксперименте используются лабораторные мыши. В экспериментальном отделе Уральского научно-практического центра радиационной медицины (УНПЦ РМ) выполняются радиобиологические исследования по изучению биологических эффектов гамма-излучения с использованием мышей нескольких линий [5]. Облучение животных проводится для моделирования острого радиационного синдрома в работах по оценке эффективности средств противорадиационной защиты [6,7]. Также в УНПЦ РМ разработана модель получения гуманизированных мышей с трансплантированными гемопоэтическими клетками человека для оценки персонифицированной радиочувствительности [8], позволяющая при облучении гуманизированных животных оценивать реакцию клеток человека на радиационное воздействие [9]. Важным требованием при проведении таких работ является возможность облучить животных в требуемой, запланированной дозе, минимизировать отличия поглощенной дозы для животных внутри одной экспериментальной группы.

В настоящее время в экспериментальном отделе УНПЦ РМ проводится масштабная экспериментальная работа по оценке влияния фракционированного гамма-облучения на высшую нервную деятельность и головной мозг. Облучение проводили в период максимальной чувствительности развивающегося головного мозга: в течение первого месяца жизни с 0–3 дня после рождения животные получали по 20 фракций общего внешнего гамма-облучения (ежедневно 5 раз в неделю).

Как правило, облучение мышей проводят в индивидуальных боксах, ограничивающих их подвижность, однако в данном случае для выполнения эксперимента новорожденных животных и животных 1-го месяца жизни было

решено облучать в клетках их постоянного содержания, чтобы минимизировать стресс и риск невыкармливания мышат из-за манипуляций экспериментатора.

Мощность поглощенной дозы, полученной мышью, зависит от возраста, определяющего размер животного и положения животного в клетке. Существующая неравномерность гамма-поля, изменения размеров и активности животных вносят вклад в неопределенность дозы, которую важно учитывать, особенно при облучении в диапазоне малых доз.

Контроль облучения животных на радиобиологической установке ИГУР-1М происходит с использованием ионизационной камеры. Поэтому встает задача перейти от дозы в воздухе к дозе на организм мышей. Вторая задача – оценка неопределенности доз облучения на установке. Основными источниками неопределенности являются:

- положение животного в камере;
- вариации во взаиморасположении животных при одновременном облучении.

Материалы и методы

Был проведен численный эксперимент по имитации облучения мышей на установке ИГУР-1М. Для этого выполнялось статистическое моделирование транспорта фотонов методом Монте-Карло в программе MCNP4C. Геометрия облучения соответствовала таковой на установке. Камера и детекторы представлены на рис.1. Четыре источника излучения представляли собой цилиндры диаметром 3 мм и высотой 40 мм из стеклосплава (бромсилкатного стекла), содержащего ^{137}Cs в пропорции 1:0,987:1:0,96. Активность-содержащий цилиндр покрыт снаружи металлическим сплавом (ХН65МВУ-ВИ, ТУ14-134-380-2000) так, что диаметр и высота источника с защитным покрытием составили 38 мм и 49 мм, соответственно. Источники помещены в капсулу из нержавеющей стали, которая моделировалась

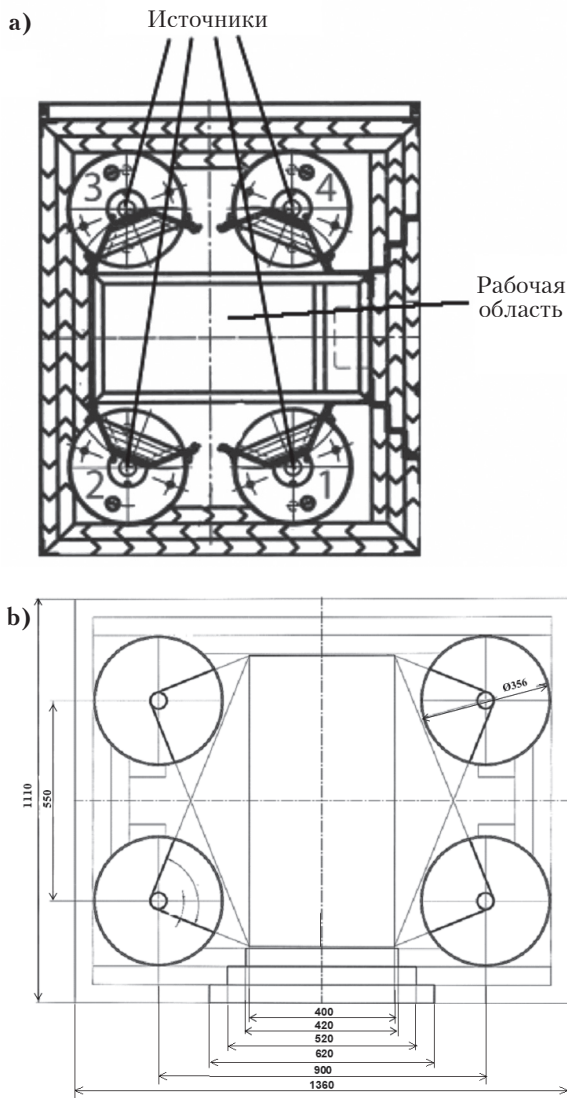


Рис.1. Горизонтальная проекция, иллюстрирующая положение детекторов (а) и размеры рабочей области (б).

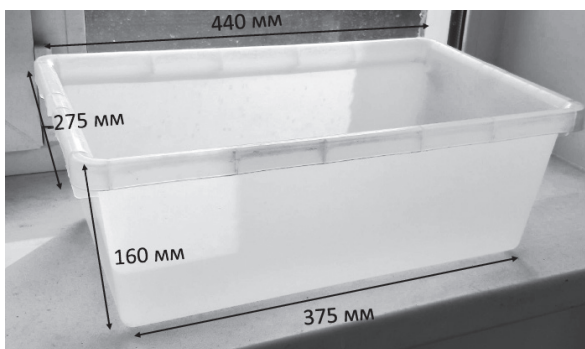


Рис.2. Клетка, геометрия которой моделировалась в численном эксперименте.

как усеченное цилиндрическое кольцо с наружным диаметром, равным 356 мм. Внутренний диаметр соответствует диаметру источника 38 мм, высота капсулы – 178,9 мм. Секущие плоскости проходят по касательной к внешней поверхности цилиндра и расположены под таким углом, чтобы проходить через ближайшие углы рабочей области (рис.1б). Рис.1 показывает положение детекторов и размеры рабочей области в горизонтальной проекции. Активность 1-го и 3-го источников в 2014 г. составляла $5,6 \cdot 10^{13}$ Бк. Активности источников 2 и 4 составляли $5,5 \cdot 10^{13}$ и $5,3 \cdot 10^{13}$ Бк соответственно.

Высота рабочей области составляет 179 см. В камере устанавливаются пластиковые клетки (рис.2). Первая клетка устанавливается на высоте 6 см от пола. Еще 5 вставляются одна в другую так, что зазор между дном нижней и верхней клетки составляет 6 см. Пять нижних клеток используются для облучения животных. В верхней располагается ионизационная камера для контроля облучения.

Были проведены расчеты мощностей доз в воздухе на разных уровнях (6 клеток – 6 уровней). Мыши моделировались в виде эллипсоида вращения (без учета хвоста). В табл.1 представлены средние значения длины и ширины тела мышей разного возраста, которые принимались в качестве больших и малых осей эллипса.

Расчеты мощностей доз в теле животных проводились в форме численного эксперимента, в котором 19 моделей мышей помещались в клетку одновременно. На каждом из 5 положений клетки над полом использовалось 6 вариантов размещений животных. На рис.3 показаны варианты размещения для моделей мышей в возрасте 2 и 7 дней. Клетки поля с разной штриховкой соответствуют разным размещениям. Белая клетка в центре поля – положение, использованное в каждом из размещений. Размеры клеток поля соответствуют

Табл.1. Морфометрические параметры моделируемых мышей.

Возраст, сутки	Масса, г	Длина, мм	Ширина, мм
2	1,5±0,1	27±2	8,3±0,6
7	2,9±0,3	39±2	12±1
13	5,7±0,1	49±1	15±2
25	8±3	61±5	23±1
29	14±2	68±3	23±5

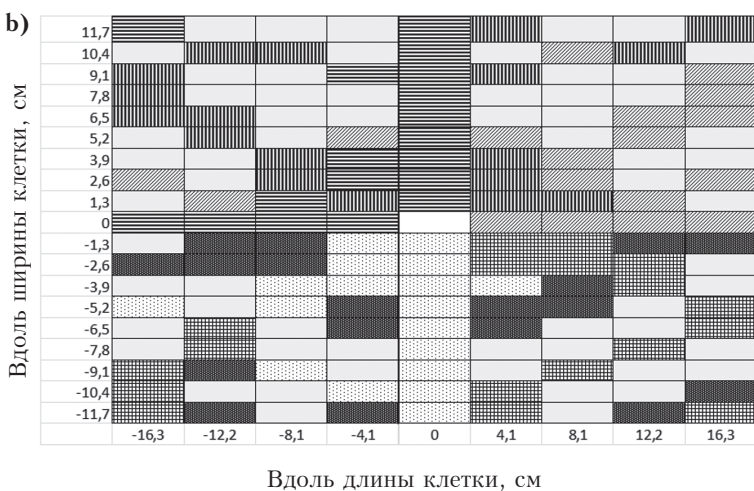
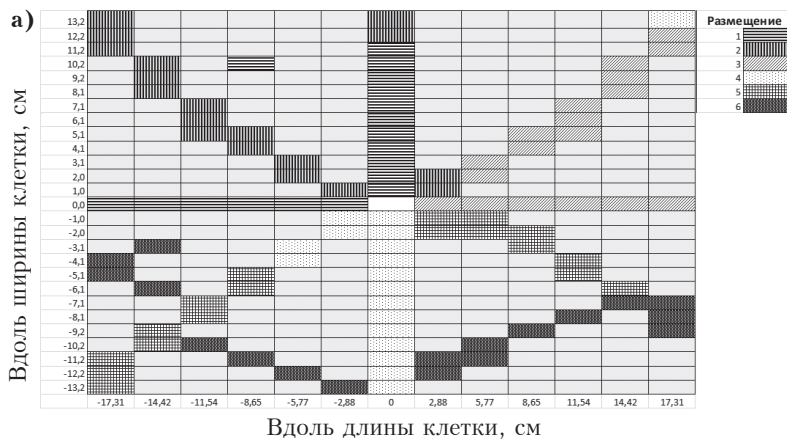


Рис.3. Варианты размещения для моделей мышей в возрасте: а) 2 и б) 7 дней.

размерам мышей заданного возраста. Поэтому при одинаковом количестве моделей, для 7-дневных мышей поле клетки заполнено более плотно. Параллельно рассчитывалась мощность дозы в воздухе в центре верхней клетки, имитируя измерение ионизационной камерой. Отдельно были проведены расчеты с одним животным в центре клетки, а также расчеты мощностей доз в воздухе в центре клеток.

Расчеты мощностей доз в воздухе были сопоставлены с показаниями клинического дозиметра ДКС5350/1 (УП «Атомтех», Республика Беларусь) с цилиндрической ионизационной камерой ТМЗ1010 фирмы РТW-Freiburg, Германия (объем 0,125 см³) в режиме измерения $K(a)$ кермы в воздухе рентгеновского и гамма-излучения.

Химический состав и плотность моделируемых сред представлены в табл.2.

Результаты Переход от дозы в воздухе к дозе на организм мышей

Сопоставление расчетов и измерений

Расчеты мощностей доз в воздухе на разных уровнях в центре клеток были сопоставлены с экспериментальными данными табл.3. Следует отметить, что измерения проводились в 2015 и в 2023 гг. Поэтому в расчетах использовалась соответствующая поправка на радиоактивный распад. Кроме того, геометрия измерений не совсем

совпадала с численным экспериментом. Измерения проводились на 3-х уровнях:

- в 2015 г. – 8 см, 15 см и 19 см;
- в 2023 г. – 6–7 см, 12–13 см и 18–19 см.

Иными словами, высота, на которой размещались детекторы, была в 2023 г. близкой к таковой в эксперименте с животными и, соответственно, в нашем численном эксперименте.

Табл.2. Химический состав (массовые доли) и плотность моделируемых сред.

Номер	Элемент	Стеклоплав	ХН65МВУ-ВИ	Сталь	Клетка	Мышь*	Воздух
1	H				0,20		
5	B	0,03					
6	O	0,47				0,382	0,219
7	N						0,788
11	Na	0,02					
12	C			0,011	0,80	0,464	0,001
13	Al	0,02					
14	Si	0,42		0,008		0,018	
16	S					0,004	
17	Cl					0,025	
19	K	0,03				0,004	
20	Ca					0,034	
22	Ti			0,004			
24	Cr		0,155	0,17			
25	Mn			0,020			
26	Fe			0,645		0,008	
28	Ni		0,808	0,118			
29	Cu					0,007	
30	Zn					0,006	
38	Sr					0,002	
42	Mo			0,025			
56	Ba					0,046	
74	W		0,038				
Плотность, г·см ⁻³		2,23	8,9	7,9	0,93	1,25	1,23·10 ⁻³

*Хим. состав и плотность тела мыши взяты согласно тканеэквивалентному пластику PLA [10]

Табл.3. Результаты измерений мощностей доз в воздухе в сопоставлении с расчетами.

Описание сравниваемых данных (год эксперимента, высота в эксперименте & высота в расчетах)	Мощность дозы, Гр*сутки ⁻¹	
	Измерение	Расчет
2015, 8 см & 6 см	1,08	0,95
2015, 15 см & 12 см	1,12	0,98
2015, 19 см & 18 см	1,05	1,02
2023, 6–7 см & 6 см	0,75	0,81
2023, 12–13 см & 12 см	0,76	0,83
2023, 18–19 см & 18 см	0,81	0,87

Как видно из табл.3, результаты численного эксперимента хорошо согласуются с физическим экспериментом (разница в среднем составляет < 1%). На рис.4 представлена корреляция измерений и расчетов.

Влияние месторасположения и размера мышей на формирование дозы в организме

Доза в воздухе в верхней клетке не эквивалентна дозам на организм облучаемых животных. Поэтому для перехода от измеренной мощности дозы к дозе в организме животных

требуется изучить зависимость отношения дозы в организме к дозе в воздухе (r – коэффициент перехода). Это отношение может зависеть как от размера животного, так и от его положения в камере. На рис.5 показаны результаты расчетов r в численном эксперименте для животных пяти разных масс (табл.1), помещенных в центр пяти клеток (поодиночке), расположенных в облучателе на высоте 6 см, 12 см, 18 см, 24 см и 30 см от уровня пола. Доза в воздухе рассчитывалась для положения, соответствующего положению ионизационной камеры в реальном эксперименте, а именно, у дна 6-й клетки, расположенной на высоте 36 см от пола (доза в воздухе на высоте 36,8 см), в ее центре.

Как видно из рис.5, коэффициент перехода слабо зависит от массы тела, начиная с ~2,7–3 г (что соответствует возрасту 7 дней). Поэтому далее коэффициенты перехода будем рассматривать отдельно для двухдневных мышей и для остальных. Разница между r в центре клетки, рассчитанных для мышей в возрасте до и после 7 дней, не превышает 11%. Разница между r для животных одного возраста внизу иверху рабочей области ИГУР составляет почти 20%. Поэтому рассмотрим каждое месторасположение по высоте по отдельности.

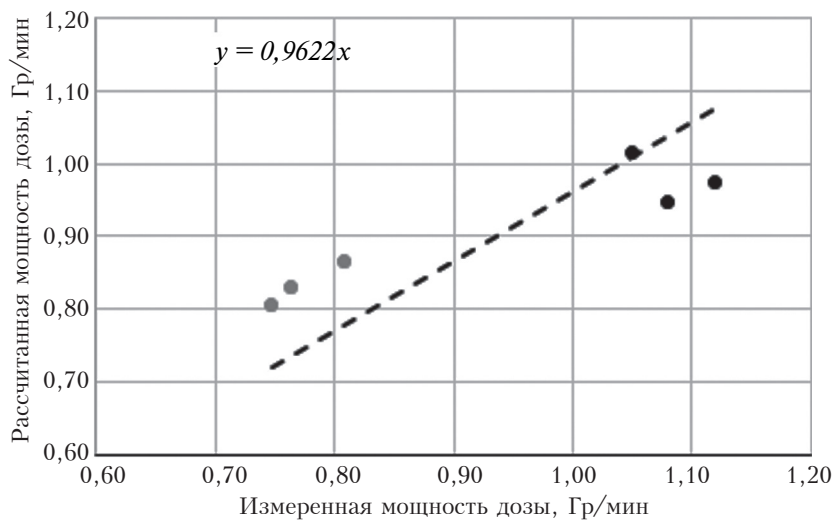


Рис.4. Рассчитанная мощность дозы в воздухе в сопоставлении с результатами измерений. Черные точки – измерения 2015 г., серые – 2023 г.

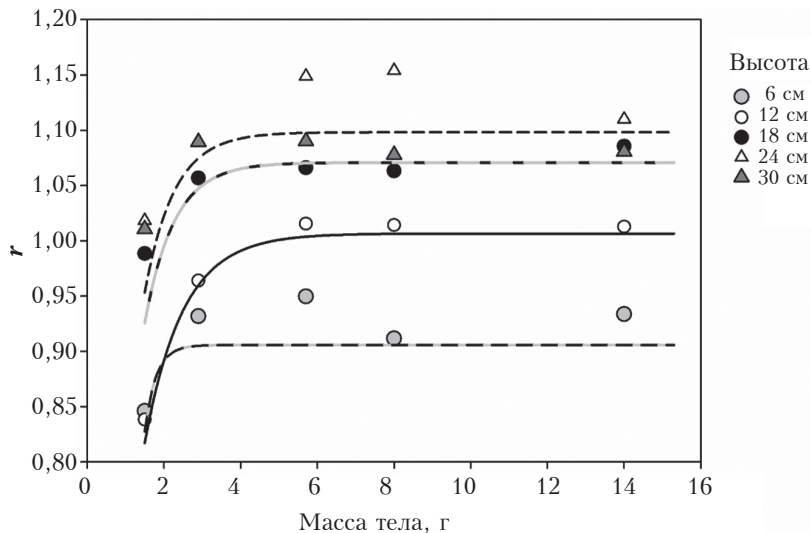


Рис.5. Результаты расчетов отношений доз на организм животных разных масс к дозе в воздухе на высоте 36,8 см. Животные расположены в центре клеток на высоте 6 см, 12 см, 18 см, 24 см и 30 см от уровня пола.

Животные в возрасте от 7 дней и старше

Рассмотрим модель 7-дневных мышей. На рис.6 представлены примеры распределений значений r при размещении животных в разных участках клеток на разных высотах от пола. Всего в каждой клетке рассчитывалась мощность дозы для 109 положений.

Как видно из рис.6, форма распределения коэффициента перехода является ассиметричной. Аналогичная форма распределения наблюдается и на уровнях в 24 и 30 см. В табл.4 приведены характеристики пространственных распределений значений r на пяти уровнях расположения клеток в облучателе.

Как видно из табл.4, коэффициент вариации для r на 6 и 12 см сопоставим с неопределенностью оценки r , что говорит об относительной однородности гамма-поля. Есть неко-

торая тенденция увеличения r при приближении к источникам, однако разница в оценках для центральных областей не превышает 7%. У клеток, размещенных выше, неоднородность поля увеличивается. Для них можно выделить 2 зоны, как показано на рис.7 (на примере высоты клетки над уровнем пола, равной 18 см). Белым цветом выделена центральная область шириной в 19,4 см ($\pm 9,7$ см; значения вдоль оси y соответствуют центру клетки). На периферии, ближе к источникам (показано

серым) значения r возрастают и статистически значимо отличаются от таковых в центре поля.

Для 18 см над уровнем пола в центральной области (белое поле на рис.7) $\bar{r}_1 = 1,06 \pm 0,03$, а на периферии, ближе к источникам, $\bar{r}_2 = 1,16 \pm 0,04$. Для 24 см эти величины составляют: $\bar{r}_1 = 1,09 \pm 0,05$ и $\bar{r}_2 = 1,20 \pm 0,05$, соответственно. Для 30 см: $\bar{r}_1 = 1,09 \pm 0,04$ и $\bar{r}_2 = 1,22 \pm 0,05$, соответственно.

Животные младше 7 дней

Рассмотрим модель мышей в возрасте двух дней. На рис.8 представлены примеры распределений значений r при размещении животных в разных участках клеток на разных высотах от пола. Всего в каждой клетке рассчитывалась мощность дозы для 109 положений.

Как видно из рис.8, форма распределения коэффициента перехода, как и в случае более крупных животных, является ассиметричной. Аналогичная форма распределения

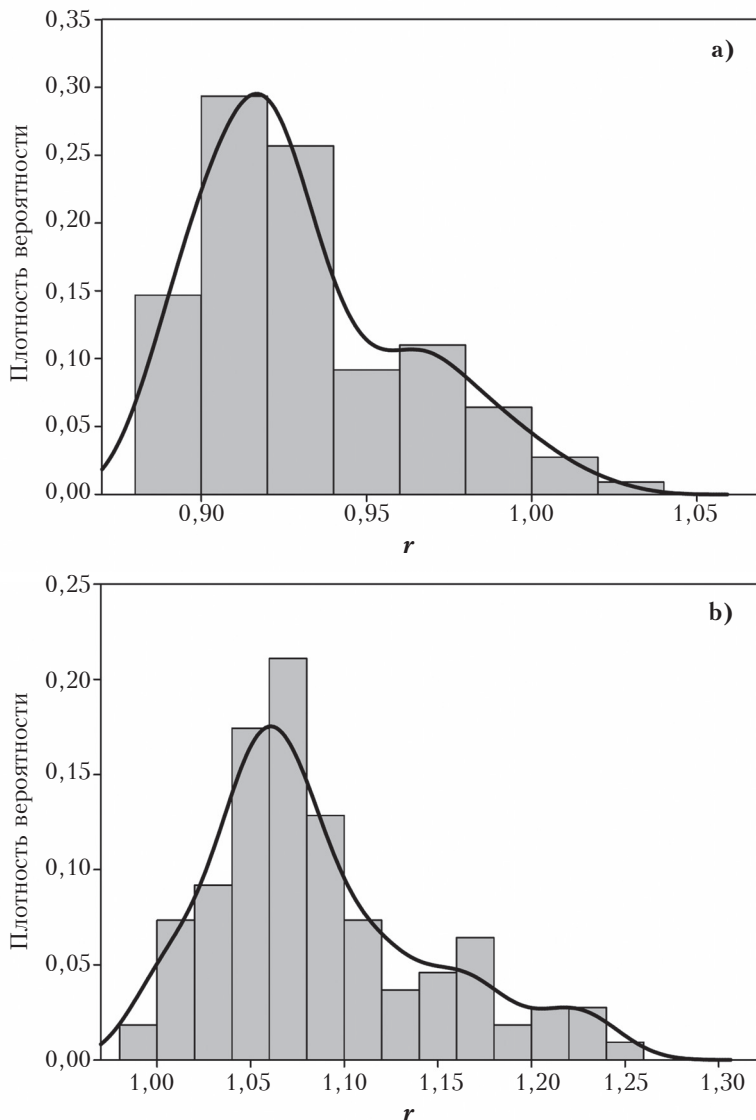


Рис.6. Ассиметричность распределения коэффициентов перехода от дозы в воздухе к дозе на организм на примере расчетов для двух высот клеток над уровнем пола: а) 6 см; б) 18 см. Сплошная линия – сглаживание методом плотности ядер.

Вдоль ширины клетки, см	11,7	1,24				1,17	1,17			1,23
	10,4		1,19	1,18		1,11		1,15	1,16	
	9,1	1,11			1,14	1,05	1,11			1,12
	7,8	1,08				1,05				1,05
	6,5	1,10	1,04			1,04			1,08	1,07
	5,2		1,05		1,09	1,04	1,09		1,05	
	3,9			1,05	1,06	1,02	1,03	1,06		
	2,6	1,08		1,04	1,04	1,00	1,00	1,05		1,07
	1,3		1,07	1,04	1,07	1,00	1,02	1,08	1,04	
	0,0	1,06	1,08	1,04	1,05	1,06	1,06	1,04	1,06	1,06
	-1,3		1,05	1,02	1,01	1,00	1,07	1,03	1,06	1,09
	-2,6	1,06	1,07	1,04	1,00	1,00	1,09	1,06	1,06	
	-3,9			1,07	1,03	1,00	1,10	1,06	1,06	
	-5,2	1,09		1,08	1,05	1,00	1,09	1,07		1,07
	-6,5		1,09		1,08	1,03	1,12			1,12
	-7,8		1,13			1,06			1,12	
	-9,1	1,12	1,17	1,16		1,08		1,15		
	-10,4	1,14			1,17	1,12	1,13			1,22
	-11,7	1,22	1,22		1,20	1,18	1,15		1,22	1,23
		-16,28	-12,21	-12,21	-4,07	0	4,07	8,14	12,21	16,28

Вдоль длины клетки, см

Рис.7. Иллюстрация распределения коэффициентов перехода от мощности дозы в воздухе к мощности дозы на тело мышей на примере клетки, размещенной на 18 см от уровня пола. Белое поле – область в интервале $\pm 9,7$ см вдоль ширины клетки, где $\bar{r}_1 = 1,06 \pm 0,03$. Серая область – область, где $\bar{r}_2 = 1,16 \pm 0,04$.

Табл.4. Характеристики пространственного распределения значений r для животных в возрасте 7 дней и старше.

Параметр распределения	Высота клетки над уровнем пола, см				
	6	12	18	24	30
Среднее	0,93	1,02	1,08	1,11	1,10
Стандарт. откл.	0,03	0,04	0,06	0,07	0,07
CV, %	3	4	6	7	6
5%	0,88	0,97	1,00	1,00	1,02
25%	0,90	0,99	1,04	1,06	1,06
Медиана	0,92	1,01	1,07	1,09	1,09
75%	0,94	1,04	1,11	1,15	1,14
95%	0,99	1,09	1,21	1,25	1,25
Минимум	0,88	0,96	0,99	0,98	0,99
Максимум	1,02	1,12	1,24	1,30	1,33

наблюдается и на уровнях в 24 и 30 см.

В табл.5 приведены характеристики пространственных распределений значений r на пяти уровнях расположения клеток в облучателе.

Как видно из табл.5, коэффициент вариации для r на 6 см сопоставим с неопределенностью оценки r , что говорит об относительной однородности гамма-поля. Есть некоторая тенденция увеличения r при приближении к источникам, однако разница в оценках для центральных областей не превышает 7%. У клеток, размещенных выше, неоднородность поля увеличивается. Для них, как и в случае с более крупными животными, следует рассмотреть 2 зоны (рис.9) (на примере высоты клетки над уровнем пола, равной 18 см). Белым цветом выделена центральная область шириной в 19,4 см ($\pm 9,7$ см; значения вдоль оси y соответствуют центру клетки). На периферии, ближе к источникам (показано серым), значения r возрастают и статистически значимо отличаются от таковых в центре поля.

Для 18 см над уровнем пола в центральной области (белое поле на рис.7) $\bar{r}_1 = 1,06 \pm 0,04$, а на периферии, ближе к источникам, $\bar{r}_2 = 1,21 \pm 0,05$. Для 12 см эти величины составляют $\bar{r}_1 = 1,01 \pm 0,04$ и $\bar{r}_2 = 1,10 \pm 0,05$, соответственно. Для 24 см эти величины составляют $\bar{r}_1 = 1,10 \pm 0,05$ и $\bar{r}_2 = 1,23 \pm 0,06$, соответственно. Для 30 см $\bar{r}_1 = 1,11 \pm 0,05$ и $\bar{r}_2 = 1,24 \pm 0,07$, соответственно.

Сравнение коэффициентов перехода при различных условиях эксперимента

Оценки коэффициентов перехода для различных экспериментальных условий представлены в табл.6.

Как видно из табл.6, различия в средних (по площади клетки) коэффициентах перехода между животными разного возраста пренебрежимо мала в отличие от r в отдельной центральной точке (рис.5). При этом коэффициенты перехода для «серой области» (рис.7) в среднем на 10% выше, чем таковые в «белой области», \bar{r}_1 .

Если учесть, что животные в раннем возрасте (< 7 дней) малоподвижны, то для них более подходит значение \bar{r}_1 , а особи старше более мобильны, и в приближении равновероятного нахождения в любой точке клетки для них более подходит \bar{r} . Эти области выделены серым в табл.6. Как видно из таблицы, эти два коэффициента для одной

и той же высоты практически совпадают. Таким образом, значения коэффициентов перехода могут быть приняты одинаковыми вне зависимости от возраста животных. Однако неопределенность, ассоциируемая с месторасположением у мышей младше 7 дней, на высотах 24–30 см будет несколько ниже, чем у более взрослых особей.

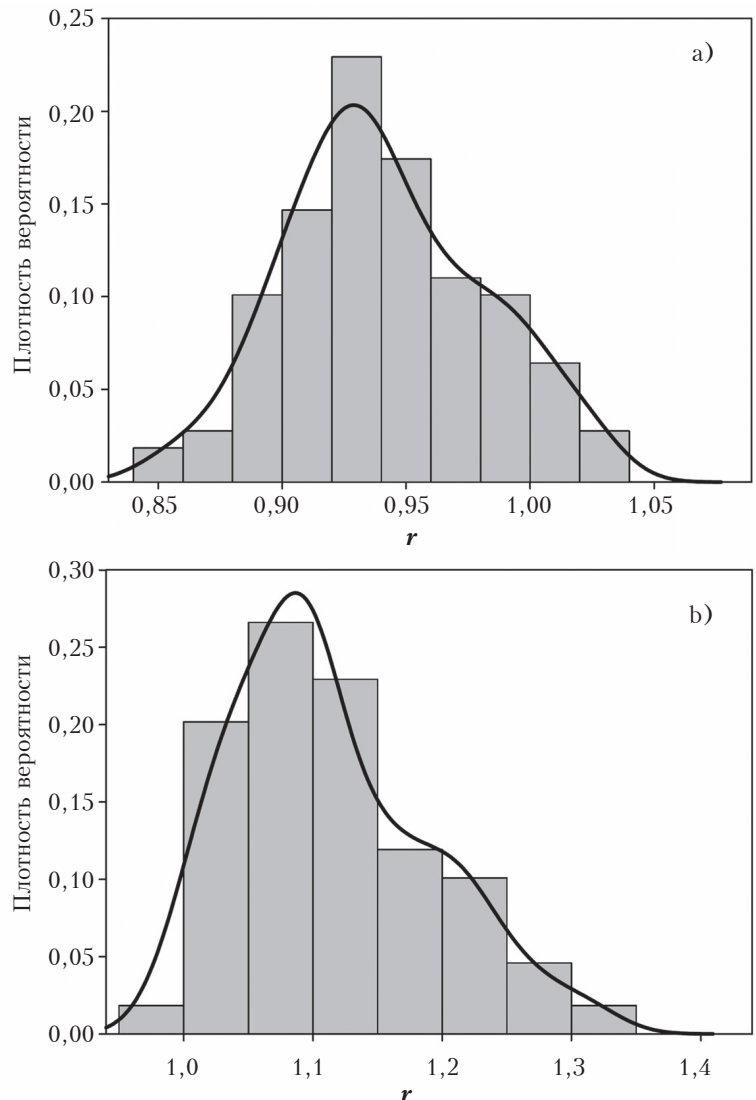


Рис. 8. Асимметричность распределения коэффициентов перехода от дозы в воздухе к дозе на организм на примере расчетов для двух высот клеток над уровнем пола: а) 6 см; б) 18 см. Сплошная линия – сглаживание методом плотности ядер.

Табл.5. Характеристики пространственного распределения значений r для животных в возрасте 2 дней.

Параметр распределения	Высота клетки над уровнем пола, см				
	6	12	18	24	30
Среднее	0,94	1,02	1,11	1,13	1,14
Стандарт. откл.	0,04	0,06	0,08	0,08	0,07
CV, %	4	6	7	7	7
5%	0,88	0,95	1,01	1,02	1,05
25%	0,91	1,00	1,06	1,08	1,09
Медиана	0,94	1,03	1,10	1,12	1,13
75%	0,97	1,07	1,16	1,18	1,19
95%	1,01	1,14	1,25	1,27	1,28
Минимум	0,85	0,89	0,99	0,66	1,01
Максимум	1,03	1,20	1,32	1,41	1,42

Неопределенности коэффициентов перехода

Источники неопределенности оценок коэффициента перехода следующие:

- статистическая ошибка моделирования методом Монте-Карло;
- погрешность из-за принятых приближений химического состава и плотности;
- вариабельность мощности дозы в организме мыши, ассоциируемая с заполнением клеток и взаиморасположением особей;
- погрешность оценки мощности дозы в воздухе в центре верхней (6-й) клетки, ассоциируемая с заполнением клеток;
- неопределенность, ассоциируемая с подвижностью животного и его перемещением по клетке в процессе облучения.

Табл.6. Сводная таблица коэффициентов перехода для различных экспериментальных условий: мыши в возрасте до и после 7 дней; уровни над полом в 6, 12, 18, 24 и 30 см; пребывание животных в центральной области клетки (\bar{r}_1) в интервале $\pm 9,7$ см вдоль ширины клетки, в периферийной области (\bar{r}_2) и равновероятно в любом месте (\bar{r}).

Уровень над полом, см	Возраст < 7 дней			Возраст 7 дней и старше		
	\bar{r}_1	\bar{r}_2	\bar{r}	\bar{r}_1	\bar{r}_2	\bar{r}
6 см	0,93±0,03	0,98±0,03	0,94±0,04	0,92±0,02	0,98±0,02	0,93±0,03
12 см	1,01±0,04	1,10±0,04	1,03±0,06	1,01±0,03	1,07±0,03	1,02±0,04
18 см	1,08±0,04	1,21±0,05	1,11±0,08	1,06±0,04	1,18±0,04	1,08±0,05
24 см	1,10±0,05	1,23±0,06	1,13±0,08	1,09±0,05	1,20±0,05	1,11±0,07
30 см	1,11±0,05	1,24±0,07	1,14±0,08	1,08±0,04	1,22±0,05	1,10±0,07

Статистическая ошибка моделирования методом Монте-Карло < 0,04%. Погрешность моделирования транспорта излучений, вызванная приближениями о химическом составе и плотности, не превышает 4% [11].

Рассматривая положение животных только в центре поля, имеем 7 вариантов расчетов на каждую высоту (6 размещений и один расчет с одним животным в центре клетки). Вариабельность мощности дозы в организме мыши, ассоциируемая с заполнением клеток и взаиморасположением особей, возрастает с высотой клетки от 1% до 3%.

Мощность дозы в воздухе в центре верхней (6-й) клетки при разных вариантах расчетов варьирует в пределах 2%, что сопоставимо с погрешностью измерения при помощи ионизационной камеры.

Неопределенность, ассоциируемая с подвижностью животного и его перемещением по клетке в процессе облучения, обсуждалась в предыдущем разделе и варьирует от 4% (животные в возрасте < 7 дней на всех высотах, животные от 7 дней и старше на высоте 6–12 см) до 7% (животные от 7 дней и старше на высоте 24–30 см).

Таким образом, основным источником неопределенности является неравномерность гамма-поля и соответствующая ему неопределенность, ассоциируемая с подвижностью животного и его перемещением по клетке.

Вдоль ширины клетки, см	13,24	1,27						1,22						1,32
	12,22	1,25						1,20						1,23
	11,20	1,15						1,16						1,18
	10,19		1,11		1,21			1,13					1,18	
	9,17		1,11					1,08					1,11	
	8,15		1,08					1,09					1,10	
	7,13			1,10				1,11				1,08		
	6,11			1,02				1,15				1,07		
	5,09			1,02	1,06			1,11			1,00	1,10		
	4,07				1,05			1,06			0,99			
	3,06					1,10		1,00		1,04				
	2,04					1,09		1,02	1,04	0,99				
	1,02						1,09	1,03	1,04					
	0,00	1,07	1,16	1,09	1,10	1,03	1,09	1,07	1,05	1,10	1,01	1,01	1,06	1,10
	-1,02						1,06	1,02	1,07	1,11				
	-2,04						1,08	1,01	1,06	1,10	1,06	1,06		
	-3,06		1,08			1,03		1,02			1,05	1,05		
	-4,07	1,07				1,05		1,03						
	-5,09	1,08			1,12			1,02						
	-6,11		1,11		1,16			1,05					1,14	
	-7,13			1,09				1,07					1,19	1,12
	-8,15			1,15				1,10						1,17
	-9,17		1,13					1,11			1,14	1,14		1,14
	-10,19		1,17	1,23				1,16		1,22				
	-11,20	1,20			1,21			1,20	1,19	1,25				
-12,22	1,27				1,19		1,21	1,22						
-13,24	1,31					1,23	1,29							
	-17,31	-14,42	-11,54	-8,65	-5,77	-2,88	0	2,88	5,77	8,65	11,54	14,42	17,31	

Вдоль длины клетки, см

Рис.9. Иллюстрация распределения коэффициентов перехода от мощности дозы в воздухе к мощности дозы на тело мышей в возрасте 2 дня на примере клетки, размещенной на 18 см от уровня пола. Белое поле – область в интервале $\pm 9,7$ см вдоль ширины клетки, где $\bar{F}_1 = 1,08 \pm 0,04$. Серая область – область, где $\bar{F}_2 = 1,21 \pm 0,05$.

Табл.7. Итоговая таблица, включающая значения r и их суммарных неопределенностей.

Уровень над полом, см	r	Относительная стандартная неопределенность, %	
		< 7 дней	от 7 дней
6	0,93	6	6
12	1,02	6	6
18	1,08	7	8
24	1,11	7	10
30			

Используя поправку r к показаниям ионизационной камеры, мы исключаем систематическую компоненту общей неопределенности оценки доз. В таком случае неопределенность коэффициента r будет соответствовать неопределенности дозы облучения животного.

Объединяя неопределенности r от всех факторов влияния, получаем, что относительная стандартная неопределенность дозы облучения животных в приборе ИГУР-1М для животных в возрасте младше семи дней не превышает 6–7%. Для более взрослых животных неопределенность дозы составляет 6%, когда клетка расположена на высоте 6 и 12 см; 8% на высоте 18 см и 10% для 24–30 см (табл.7).

Литература

1. Тряпицына Г.А., Тарасова С.П., Духовная Н.И., Осипов Д.И., Пряхин Е.А. Экспериментальная оценка сочетанного действия нитратов и острого γ -облучения на рост зеленых водорослей *Scenedesmus quadricauda* // Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. № 3(52). С. 298-304.
2. Ахмадуллина Ю.Р., Стяжкина Е.В., Гайнетдинова Ю.В., Петрова А.В. Мутагенное действие ионизирующего и неионизирующего электромагнитного излучения на *Drosophila melanogaster* // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2022. № 11(174). С. 633-636.
3. Алдибекова А.Е., Стяжкина Е.В., Пряхин Е.А. Изучение комбинированного действия импульсного магнитного поля и гамма-излучения на частоту хромосомных aberrаций в клетках корня *Allium* сера L. // VIII Съезд по радиационным исследованиям. Тезисы докладов (Москва, 12–15 октября, 2021). Дубна: Изд-во Объединенный институт ядерных исследований, 2021. С. 51.
4. Когарко И.Н., Петушкова В.В., Когарко Б.С., Пряхин Е.А., Нейфах Е.А., Киторова О.В., Андреев С.С., Ганеев И.И., Кузьмина Н.С., Селиванова Е.И., Пелевина И.И. Исследование действия ионизирующего излучения на радиационно-индуцируемые изменения клеток системы крови мышей на уровне организма // Радиация и риск. 2023. № 1(32). С. 48-60.
5. Атаманюк Н.И., Стяжкина Е.В., Обвинцева Н.А., Тряпицына Г.А., Шапошникова И.А., Андреев С.С., Алдибекова А.Е., Перетькин А.А., Пряхин Е.А. Кинетика гибели и восстановления клеток костного мозга у мышей двух линий с разной радиочувствительностью после острого γ -облучения // Вопросы радиационной безопасности. 2021. № 4. С. 62-72.
6. Аклеев А.В., Пряхин Е.А., Тряпицына Г.А., Остроумов Ю.И., Семенкова Л.Н., Дудич И.В., Гребенников Е.П., Шмелин П.С. Пат. Ru 2699040 С1 МПК А61К 38/18 (2006.01); А61Р 39/00(2006.01) Способ экстренной профилактики и лечения острой лучевой болезни. Заявл. 23.07.2018. Опубл. 03.09.2019. Бюл. № 25. С. 43.

Выводы

1. Коэффициенты перехода от дозы, измеренной ионизационной камерой, к дозе на организм мыши для высот расположения клеток над полом в 6 см, 12 см, 18 см и 24–30 см равны 0,93, 1,02, 1,08 и 1,11, соответственно.

2. Относительные стандартные неопределенности доз облучения для маломобильных мышей в возрасте до семи дней равны 6% на высоте клеток от уровня пола в 6–12 см и 7% на высоте 18–30 см.

3. Относительные стандартные неопределенности доз облучения для мышей в возрасте от семи дней и старше равны 6% на высоте клеток от уровня пола в 6–12 см, 8% на высоте 18 см и 10% на высоте 24–30 см.

7. Аклеев А.В., Шапошникова И.А., Чурилова И.В., Гребенюк А.Н., Пряхин Е.А. Влияние препарата супероксиддисмутазы «Рексод» на число КОЕс у облученных мышей // Радиационная биология. Радиоэкология. 2021. № 2(61). С. 159-167.
8. Атаманюк Н.И., Пряхин Е.А., Стяжкина Е.В., Обвинцева Н.А., Тряпицына Г.А., Перетыкин А.А., Андреев С.С., Алдибекова А.Е., Аклеев А.В. Оценка персонифицированной реакции гемопоэтических стволовых клеток на гамма-облучение с использованием гуманизированных мышей // Медицина экстремальных ситуаций. 2023. № 1. С. 44-50.
9. Атаманюк Н.И., Андреев С.С., Перетыкин А.А., Стяжкина Е.В., Обвинцева Н.А., Тряпицына Г.А., Пряхин Е.А. Гуманизированные мыши как модель для оценки реакции гемопоэтических стволовых клеток человека на радиационное воздействие // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2023. № 7(176). С. 44-48.
10. Y. Choi, Y.J. Jang, K.B. Kim, J. Bahng, S.H. Choi, «Characterization of Tissue Equivalent Materials Using 3D Printing for Patient-Specific DQA in Radiation Therapy», *Appl. Sci.*, no. 12, pp. 9768., 2022.
11. Шишкина Е.А., Шарагин П.А., Толстых Е.И. Неопределенность оценки доз в костном мозге от $^{89,90}\text{Sr}$ из-за изменчивости химического состава и плотности кости // Радиационная гигиена. 2023. № 16(2). С. 32-43.

Whole Organism Doses and their Uncertainties During Mice Exposure at the Gamma Radiobiological Installation IGUR-1M

Shishkina Elena, Atamanyuk Natalia, Peretykin Andrei, Pryakhin Evgeny
(Urals research center for radiation medicine, Chelyabinsk, Russia)

Abstract. In the experimental department of the Urals research center for radiation medicine (Chelyabinsk, Russia) the radiobiological studies are carried out with the IGUR-1M gamma installation. In this study, the numerical experiment has been performed to specify the radiation doses in experimental mice and corresponding uncertainties. We evaluate the factors converting the dose in air measured by the ionization chamber to the dose to an organism, which is dependent on the height of the cage with the animals. The relative standard uncertainties of radiation doses for mice under 7 days of age do not exceed 7%. For more active older animals, the uncertainty of the delivered radiation doses can reach 10%.

Key words: IGUR-1M, radiation dose, dose uncertainty, numerical experiment.

Е.А.Шишкина^{1,2} (д.б.н., и.о.зав.лаб.), Н.И.Атаманюк^{1,2} (к.б.н., с.н.с.), А.А.Перетыкин¹ (м.н.с.), Е.А.Пряхин¹ (профессор, д.б.н., зав.отд.)

¹ ФГБУН УНПЦ РМ ФМБА России, г. Челябинск

² ФГБОУ ВО ЧелГУ, г. Челябинск

Контакты: тел. +7 (902) 896-51-71; e-mail: lena@urcrm.ru