ФЕНОМЕН ТОПЛИВНЫХ ЧАСТИЦ В ПОСЛЕДСТВИЯХ АВАРИИ НА ЧАЭС

А.П. Ермилов

ООО «НТЦ Амплитуда»

Аннотация

Представлены результаты собственных исследований (1986÷1990) аэрозольных выпадений на западном следе, образовавшемся сразу после взрыва. На этой основе реконструированы характеристики (физико-химические формы, радионуклидный состав, АМАД и т.д.) аэродисперсной системы, образовавшейся сразу после взрыва активной зоны предаварийного реактора. В рамках дыхательной модели 66 Публикации МКРЗ проведена оценка вкладов в значения дозы облучения отделов органов дыхания и ЖКТ, ингаляцией топливных частиц (микроскопические обусловленных фрагменты взорвавшихся ТВЭЛ, в основном сохранившие радионуклидные характеристики ТВЭЛ, от взрыва которых они образовались). Показано, что причиной массового кашля летом 1986 г. на территориях, подвергшихся аварийным выпадениям, были выпадения «горячих» частиц. «Горячие» частицы – компактные включения продуктов деления, состоявших в основном из атомов близких к благородным металлам (молибден, рутений, родий и т.д.), образовавшихся за время штатной кампании в топливных таблетках, и высвободившихся из них при взрыве активной зоны. Получено объяснение причин несоответствия между клиническими последствиями и приписанными значениями дозы для пострадавших, оказавшихся в момент аварии в помещениях АЭС, и погибших от острой лучевой болезни через три-четыре недели после аварии.

Ключевые слова: Чернобыльская АЭС, авария, ядерное топливо, топливные частицы, «горячие» частицы, «летучая» фракция, острая лучевая болезнь.

Введение

В статье подведены итоги исследований, предварительные результаты которых под же названием опубликованы в [1,2,3]. На первый взгляд представляется тем парадоксальным, что по результатам измерений почти тридцатилетней давности можно получить какие-либо уточнения дозиметрических оценок, проясняющих причины, приведшие, в том числе, к летальным исходам пострадавших, но это только на первый взгляд. Дело в том, что по понятным причинам не были известны характеристики даже основных факторов опасности, возникших сразу после взрыва реактора. Из-за практически полного отсутствия результатов соответствующих измерений соотношения и значимость факторов опасности оценивались по мере проявления их действия на пострадавших. Ясно, что при этом что-то было упущено, и это сказалось на качестве дозиметрических оценок. В первую очередь были неизвестны значения активности поступления и такие его характеристики, как физико-химические формы аэрозолей, их дисперсность, и даже радионуклидный состав. Таким образом, например, «выпал» из рассмотрения «транзит» - очистка экстраторакальных и бронхиального отделов органов дыхания путем перехода ингалированной активности в ЖКТ.

возникших Ретроспективное воссоздание поставарийных условий, И существовавших в течение первых минут, и десятков минут после аварии и фактически определивших дальнейшую судьбу людей, оказавшихся в это время на станции или в ее окрестностях, оказалось непростой задачей. Некоторые весьма существенные аспекты произошедшего удалось оценить по результатам измерений, проведенных на следах первого выброса на расстоянии в более чем 1000 км от станции и спустя месяцы и даже годы после аварии. К этому времени уже были сделаны «окончательные» выводы, обретшие к настоящему времени статус непреложных аксиом со всеми вытекающими последствиями. Тем не менее, некоторые заключения о причинах, повлекших те или иные клинические проявления воздействия ионизирующих излучений, полученные по результатам измерений, не успевших войти в «официальные» анналы и следующие из них выводы не только представляют интерес и заслуживают внимания, но и могут оказаться необходимым дополнением и даже коррективой сложившейся традиции.

Есть и продуктивный опыт проведения подобной работы - в свое время дозиметрические оценки радиологических последствий атомной бомбардировки Хиросимы и Нагасаки на протяжении практически 30 лет пересчитывали несколько раз по мере постепенно открывавшихся уточнений. Прямых измерений не было и не могло быть, и дозиметрические оценки проводили по результатам косвенных измерений и анализа клинических проявлений острой лучевой болезни (ОЛБ) у пострадавших. В этом отношении ситуация, сложившаяся на ЧАЭС сразу после взрыва, сходна с Хиросимой и Нагасаки. Результатов непосредственных измерений радиационной обстановки, сложившейся сразу после взрыва, не было и не могло быть, также, как и в Японии в свое время.

1 Предаварийный реактор

Исходная предпосылка в [1; 2; 3] состоит в том, что основные характеристики предаварийной активной зоны реактора должны были закономерным образом проявиться в физико-химических и р/н характеристиках аварийных выбросов и тем самым в значительной степени определить последствия аварии.

Ядерный энергетический реактор РБМК-1000 тепловой мощностью 3200 МВт – гетерогенный канальный реактор на тепловых нейтронах, в котором в качестве топлива используется слабообогащенный по U-235 диоксид урана, в качестве замедлителя – графит, а в качестве теплоносителя – кипящая легкая вода. Авария произошла при окончании кампании перед предполагавшейся перезагрузкой активной зоны.

Таблица 1

Усредненные по АЗ значения отношения удельной активности р/н к удельной активности ¹⁴⁴Се в доаварийном топливе на 24 часа после катастрофы [4], при среднем значении удельной активности ¹⁴⁴Се - 1,74·10¹⁰ Бк/г. Значение средней энергии бета-излучения на момент аварии составляло $\bar{E}_{\beta} \approx 340$ кэВ.

Ce-144	1.0	I-132	0.97	Ag-110m	0.0072	Pm-151	0.076
Sr-89	0.82	I-133	0.66	Ag-111	0.038	Sm-151	0.00032
Sr-90	0.055	I-135	0.083	Ag-112	0.0066	Sm-153	0.43
Sr-91	0.14	Cs-134	0.038	Cd-115	0.0045	Eu-154	0.0021
Y-90	0.06	Cs-136	0.19	In-115m	0.0048	Eu-155	0.014
Y-91	1.1	Cs-137	0.073	Sn-121	0.0028	Eu-156	0.55
Zr-95	1.4	Ba-140	0.90	Sb-122	0.0021	Eu-157	0.019
Zr-97	0.41	La-140	1.6	Sb-124	0.0023	Tb-160	0.00097
Nb-95	1.3	La-141	0.012	Sb-125	0.0048	Tb-161	0.0012
Nb-95m	0.0086	Ce-141	1.4	Sb-127	0.052	U-237	0.29
Nb-96	0.0027	Ce-143	0.72	Sb-128	0.0012	Np-238	0.15
Nb-97	0.45	Pr-142	0.52	Sb-129	0.003	Np-239	5.0
Nb-97m	0.41	Pr-143 m	1.4	Te-127	0.059	Pu-243	0.0014
Mo-99	1.2	Pr-144	1.0	Te-127m	0.0097	Pu-238	0.00020
Tc-99m	1.2	Pr-144m	0.014	Te-129	0.033	Pu-239	0.00021
Ru-103	1.1	Pr-145	0.034	Te-129m	0.045	Pu-240	0.00044
Ru-105	0.0093	Nd-147	0.52	Te-131	0.017	Pu-241	0.050
Ru-106	0.3	Pm-147	0.029	Te-131m	0.076	Pu-242	0.00000059
Rh-105	0.41	Pm-148	0.076	Te-132	0.50	Am-241	0.000038
Rh-106	0.32	Pm-148m	0.069	I-130	0.0041	Cm-242	0.0086
Pd-109	0.052	Pm-149	0.45	I-131	0.59	Cm-244	0.000044

Примечание: В дальнейшем изложении значения активности p/н и их соотношения приведены по распаду к 26.04.1986 г.

На тот момент в топливных каналах реактора находилось 1659 ТВС, в каждой из которых было по 18 ТВЭЛ. Для обеспечения постоянной номинальной мощности в течение времени кампании энерговыработку ТВС регулировали путем их перестановки в A3, а также заменой «выгоревших» ТВС на новые. К моменту аварии энерговыработка 1192 ТВС составляла от 10.53 до 14.04 МВт сут/кг, а 467 ТВС – от 0 до 10.52 МВт сут/кг. Вследствие этого обстоятельства данные, приведенные в табл. 1, являются итогом усреднения достаточно вариабельных значений удельной активности р/н в ТВС различной энерговыработки, что можно видеть на графиках рис. 1. На рис. 1 приведены результаты расчета значений соотношения удельной активности некоторых р/н в ТВС различной энерговыработки и соответствующие значения удельной активности р/н Се-144. Приведенная на рис. 1 зависимость отношения р/н Сs-137 и Cs-134 использовалась как «цезиевое» отношение р/н Cs-137 и Cs-134 для определения энерговыработки фрагментов диспергированного топлива в выпадениях.



Рис.1 – Значения удельной активности р/н Се-144 и соотношения некоторых р/н в предаварийном топливе в ТВС различной энерговыработки на 26.04.86 г.

Изложенные обстоятельства явились причиной своего рода «макроскопической» неоднородности значений удельной активности р/н в ТВЭЛ, находившихся в разных ТВС. Наряду с «макроскопической» причиной более существенную роль в последствиях аварии сыграли «микроскопические» неоднородности распределения продуктов деления [ПД] и активационных р/н в топливе предаварийного реактора.

ТВЭЛы реактора РБМК-1000 – длинные металлические трубки, изготовленные из циркониевого сплава внутренним диаметром 13,6 мм, содержащие топливные таблетки. Таблетки изготавливают прессованием микрогранул диоксида урана размером ~ 6 мкм. По 18 ТВЭЛ находятся в корпусе каждой ТВС, через которую прокачивают воду первого контура. Тепловыделение с поверхности ТВЭЛ превращает воду в пароводную смесь под давлением ~70 атм. и температурой ~300 °C. Далее пар отделяют от воды и направляют в турбину электрогенератора. Температура центральной части таблеток достигает ~1800 °C, а температура их периферии ~700 °C.

Пробег атомов ПД в веществе топливной таблетки составляет около 10 мкм. Таким образом во время нормальной эксплуатации реактора атомы ПД могут выходить из микрогранул диоксида урана в межгранулярные пустоты и образовывать там «замороженные» инклюзии ПД, что приводит к перераспределению ПД в объеме таблетки и появлению «микроскопических» неоднородностей распределения ПД в топливе.

2 Оценка энерговыделения взрыва

Причиной взрыва (взрывов) был разгон реактора на термализованных мгновенных нейтронах. Фаза взрыва продолжалась до прекращения термализации, т.е. прекратилась сразу после разрушения графитовой кладки. В описании кинетических последствий аварии фигурирует плита биологической защиты «Елена», оказавшаяся после взрыва в вертикальном положении на ребре. Плита представляет собой диск массой ~2,5 ·10⁶ кг, диаметром ~20 м. Одновременно были оборваны многочисленные металлические конструкции, снесена и разрушена крыша реакторного зала, выброшена на крышу машзала и прилегающую территорию значительная часть АЗ и т. д. Оценки аварийного энерговыделения близки к ~25 ·10¹⁰ Дж. В норме скорость деления урана в реакторе обеспечивала энерговыделение ~3,2*10⁹ Дж/с, т.е. за доли секунды разделилось то, что должно было разделиться за ~100 с. Отсюда следует, что вклад активности ПД взрыва не мог оказать заметного влияния на р/н характеристики доаварийного реактора, приведенные в табл. 1.

3 Исходные предпосылки

Сразу после взрыва над развалом реактора образовался факел выброса высотой до нескольких сотен метров. Радиус разброса обломков активной зоны, упавших на землю и на крыши станционных сооружений, оказался более сотни метров. Значительную долю обломков составили фрагменты TBC, содержавшие облученное топливо, фрагменты графитовой кладки, другие конструкционные элементы и осевшие фрагменты диспергированных топливных таблеток.

Дозовое поле фотонного излучения на территории разброса сформировалось сразу после взрыва и наряду с дозой внешнего излучения от факела выброса явилось основной причиной последующей смерти весной и летом 1986 г. в больнице №6 людей, оказавшихся в ночь после взрыва на территории АЭС вне станционных помещений. Забегая вперед, можно утверждать, что на фоне индивидуальных значений дозы внешнего излучения внутреннее облучение, дозы которого рассчитаны по результатам посмертных измерений активности в легких, не могло оказать существенного влияния на судьбу этих людей.

Что касается внутреннего облучения, обусловленного ингаляционным поступлением активности, то разрушения, вызванные взрывом, привели к тому, что сразу после взрыва вентиляционная труба высотой 110 метров оказалась напрямую соединена с развалом реактора через некоторые помещения АЭС, в которых находились люди. «Сквозняк» протянул газоаэрозольный выброс через эти помещения примерно за 10 минут, в течение которых восточный ветер «смахнул» факел аварийного выброса с территории

Чернобыльской АЭС. Кроме того, для людей в зданиях АЭС, наряду со «сквозняками» в некоторые помещения продукты диспергированного топлива были «доставлены» действием приточной вентиляции, которая исправно работала и в момент взрыва, и после него.

После аварии в больницу №6 Минздрава СССР поступили более ста человек, оказавшихся в ночь с 26 на 27 апреля на территории и в помещениях Чернобыльской АЭС [6]. По результатам измерений были получены:

- гематологические оценки индивидуальных значений поглощённой дозы по результатам измерений проб крови, отобранных в первые дни после поступления людей в больницу;

- результаты прижизненных измерений активности проб мочи и крови;

- результаты измерений удельной активности р/н в посмертных пробах органов и тканей пострадавших, умерших в больнице весной и летом 1986 г;

- значения времени дожития – прожитых суток с момента получения дозы внешнего излучения и ингаляционного поступления активности в ночь с 25 на 26 апреля до момента смерти.

Для проведения оценок значений дозы внутреннего облучения необходимо было наряду с использованием больничных измерений экстраполировать результаты исследований аварийных аэрозольных выпадений на характеристики аэродисперсной системы, обусловившей поступление радиоактивности людям, оказавшимся в помещениях и на территории АЭС сразу после взрыва.

Исследования выпадений [5; 7; 8; 9] показали, что предаварийная история топлива и условия во время взрыва привели к образованию в первичном выбросе газоаэрозольной системы, содержавшей:

- нерастворимые в жидкостях организма частицы диспергированного топлива (топливные частицы) размером от долей мкм до долей мм и объёмной активностью порядка 1 Бк/мкм³, в основном сохранившие р/н характеристики и значения удельной активности ТВЭЛ, от взрыва которых они образовались.

- «свободные» атомы и молекулярные соединения паров р/н «летучих» элементов, часть атомов которых в топливных таблетках «вышла» из топливных гранул в межгранулярные пустоты топливных таблеток во время штатной эксплуатации реактора и вылетела вместе с диспергированным топливом при взрыве реактора (атомы РБГ, а также в основном атомы йода, теллура, цезия);

- «горячие» частицы с максимальным размером до нескольких мкм и объемной активностью ~50 Бк/мкм³, образовавшиеся в межгранулярных пустотах топливных таблеток во время штатной эксплуатации реактора за счет «выхода» из топливных гранул и последующего «замерзания» в межгранулярных пустотах атомов осколков деления – элементов с высокой температурой кипения (рутений, родий, молибден, технеций, серебро и близких к ним элементов) [9].

Таким образом, ингаляционные поступления р/н цезия, йода, теллура произошли в составе топливных частиц (нерастворимая форма) и в виде отдельных атомов и низкомолекулярных соединений (растворимая форма).

4 Радионуклидные соотношения в выпадениях

К осени 1987 года из-за распада от бета-излучающих «нелетучих» р/н в выпадениях остались Zr-95, Nb-95, Ce-144, Pr-144, Eu-154, Eu-155, Sr-90, Y-90, Ru-106, Rh-106, трансурановые элементы (ТУЭ), а из «летучих» - Cs-134, Cs-137.

Счастливой методической находкой при исследовании выпадений явилось использование широко распространенных в деревнях и малоэтажных поселениях повсеместных самодельных деревянных скамеек (лавочек) в качестве паллиатива

седиментационных пробоотборников аэродисперсных проб [10; 11]. Осенью 1986 года в 150 населенных пунктах, подвергшихся аварийным выпадениям ЧАЭС, были проведены ~1200 измерений значений скорости счета альфа-излучения с поверхности «лавочек» переносными альфа-радиометрами.

Подробное описание исследований «лавочек» - в статьях и отчетах. Осенью 1987 года было отобрано в 51 поселениях зоны ЧАЭС по два фрагмента «лавочек» размером ~15х10 см². Эти артефакты составили банк аэрозольных выпадений (БАВ), хранившийся во ВНИИФТРИ. По существу, это была уникальная коллекция тонкослойных седиментационных проб выпадений. В январе 1988 г. все образцы были подвергнуты измерениям на ППД гамма-спектрометре, часть из них - на сцинтилляционном бета-спектрометре и сцинтилляционном альфа-радиометре, а некоторые из них - контактной радиографии на рентгеновской пленке.

Результаты измерений проб БАВ на ППД гамма-спектрометре и измерений проб грунта, выполненных на ППД гамма-спектрометрах в других организациях, показали, что в целом р/н состав диспергированного топлива соответствует усредненным характеристикам, приведенным в табл. 1. Но есть и существенное отличие – исследования выпадений показали, что р/н состав выпадений соответствует топливу предаварийного реактора с глубиной выгорания примерно на 20% меньше, чем в среднем по предаварийному реактору, т. е. соответствует преимущественному диспергированию и, следовательно, «участию» во взрыве содержимого ТВС последних загрузок.

Таблица 2

Приведенные по распаду на 26 апреля 1986 г. радионуклидные соотношения в пробах БАВ на разном расстоянии от ЧАЭС в логнормальном представлении. В скобках – β_g , внизу – объем выборки.

Расстоя	иние, 3÷17,9	18÷29,9	30÷60
	KM		
р/н			
Ce-144/Zr-95	0,60 (1,1)	0,60 (1,1)	0,59 (1,1)
	13	31	7
Eu-154/Zr-95	$0,90 \cdot 10^{-3}(1,3)$	$1,1\cdot10^{-3}(1,3)$	-
	12	20	
Cs-137/Zr-95	0,051 (1,7)	0,10 (2,6)	0,46 (9,8)
	13	31	9
Cs-137/Cs-134	1,88 (1,05)	1,85 (1,05)	1,76 (1,06)
	13	28	7

В таблице 2 приведены р/н соотношения, полученные гамма-спектрометрией проб БАВ. Из данных таблицы 2 видно, что циркониевые отношения «нелетучих» практически не варьируют от пробы к пробе, не зависят от расстояния и близки к их топливным значениям из таблицы 1. Так же ведет себя и отношение р/н цезия между собой. В то же время отношение активности р/н Cs-137/Zr-95 на больших расстояниях значительно превышает топливное значение, с уменьшением расстояния до реактора падает, приближаясь к топливному, и сильно флуктуирует от пробы к пробе.

В табл. 3 приведены данные по пяти пробам БАВ, отобранным только вблизи от ЧАЭС. В отличие от данных, приведенных в табл. 2, циркониевые отношения цезия, приведенные в табл. 3, практически не флуктуируют, а по величине даже меньше топливного из табл. 1. Отсюда можно заключить, что пробы, фигурирующие в табл. 3, содержат диспергированное топливо, несколько обедненное «летучими». Поскольку с увеличением расстояния от реактора в выпадениях растет доля испарившихся межгранулярных инклюзий, обусловливая увеличение вклада «летучих» р/н, выявленное в данных табл. 2, то можно заключить, что сразу после взрыва все компоненты аэродисперсной системы вылетели вместе.

8

Таблица З

	/				
Направление	Запад	C3	CB	Юг	ЮЗ
Расстояние, км	3	7	7	5	8
Ce-144/Zr-95	0,63 (4)	0,67 (5)	0,59 (5)	0,63 (5)	0,59 (5)
Eu-154/Zr-95	$0,94 \cdot 10^{-3}(15)$	$0,8 \cdot 10^{-3} (15)$	$1,1\cdot10^{-3}$ (15)	$0,88 \cdot 10^{-3} (10)$	$0,71 \cdot 10^{-3}$ (10)
Cs-137/Zr-95	0,034 (5)	0,044 (4)	0,046 (5)	0,040 (4)	0,035 (5)
Cs-137/Cs-134	1,9 (4)	1,8 (6)	1,7 (9)	1,9 (5)	1,9 (4)
Sb-125/Ce-144	$4,5\cdot10^{-3}$ (12)	$4,9.10^{-3}$ (20)	$2,5\cdot10^{-2}$ (23)	$5,2\cdot10^{-3}$ (20)	$4,3\cdot10^{-3}$ (20)

Характерные р/н соотношения в пробах БАВ вблизи от ЧАЭС на 26.04.1986 г. В скобках-СКО (%).

Кроме того, в выпадениях вблизи от ЧАЭС содержание радиоцезия в «истинном» топливе было примерно вдвое меньше расчетного значения, соответствующего данным, приведенным в табл. 1, т. е. другими словами, примерно половина цезия была выброшена из реактора в виде «свободных» атомов.

5 Топливные частицы

На рис. 2 и рис. 3 представлены позитивные отпечатки контактных координатнозависимых радиографий, образованных β -излучением проб БАВ на рентгеновской пленке, характеризующиеся значениями отношения активности р/н Cs-137/Zr-95, равным 0,065 в пробе на рис. 2а,б и равными 1,05 и 5,5 на пробах, представленных на рис. 3а,б. Р/н состав пробы на рис. 2а,б оказался практически топливным для всех радионуклидов и даже для р/н Cs-137, а пробы на рис. 3а,б в разной степени обогащены р/н Cs-137, т. е. пробе на рис. 2а,б соответствует практически чистое топливо, а пробы на рис 3а,б обогащены «летучим» цезием, который в течение 1,5 лет пребывания под открытым небом оставался в углублениях досок, повторяя текстуру дерева.

Пробы БАВ, характеризуемые циркониевым значением отношения Cs-137, близким к топливному, были подвергнуты сканированию их поверхности бета-счетчиком, коллимированным до диаметра 5 мм. Сканирование показало, что практически вся активность бета-излучающих р/н этих проб сосредоточена в точках их поверхности, давших видимые отпечатки на радиографиях. Распределение активности альфаизлучающих р/н по поверхности проб БАВ изучено с помощью координатно-зависимых измерений. На «привязанных» к поверхности проб отпечатках, подобных рис. 2а,б в ~3 местах засветки прокалывались отверстия диаметром MM, превращавшие фотоотпечаток пробы в «интегральный коллиматор» ее альфа-излучения.

Измерения скорости счета альфа-излучения с поверхности этих проб БАВ, покрытых «коллиматорами» и без них, показали, что активность альфа-излучающих р/н проб БАВ также, как и бета- излучающих р/н сосредоточена в точках засветки. Проведенные исследования показали, что аэродисперсная система, образовавшая аварийные выпадения ЧАЭС, содержала образовавшиеся во время взрыва «нерастворимые» частицы диспергированного топлива, и фракции, образовавшиеся при этом из вещества инклюзий.

Исследования показали, что значение отношения p/н Cs-137/Cs-134 в пробах БАВ, не обогащенных цезием, такое же, как и во всех пробах, равно топливному из табл. 2 и не варьирует по пробам, несмотря на сильную зависимость от энерговыработки, (см. рис 1). Отсюда следует, что в пробах БАВ относительный вклад топливных частиц, образовавшихся из ТВС разной энерговыработки, совпадает с их представительством ко всему реактору на 26.04.86 года. Исследования позволили использовать данные проведенных осенью 1986 г. мобильных полевых измерений скорости счета альфа-

излучения с поверхности «лавочек» для построения карты выпадений диспергированного топлива.





Рис. 2 а,б – позитивные отпечатки с радиографий пробы БАВ (январь 1988 г.), отобранной в п. Чикаловичи (сентябрь 1987 г.), характеризуемые соответственно значениями времени экспозиции – 1 час (а) и 13 часов (б). Отношение активности Cs-137/Ce-144=0,065 (на 26.04.1986 г).





Рис. 3 а,б – позитивные отпечатки с радиографий проб БАВ (январь 1988 г.), отобранных в Пирки а) и Весняное (сентябрь 1987 г.) б), характеризуемые, соответственно значениями Cs-137/Ce-144 – 1,07 и 5,5 (на 26.04.1986 г.). Время экспозиции 13 часов.

С этой целью были рассчитаны значения плотности выпадений топливных частиц [г/км²] для 150 населенных пунктов, расположенных в зоне аварийных выпадений ЧАЭС на расстоянии до 80 км от ЧАЭС.

На основе проведенных исследований была разработана фоторадиометрическая методика измерений характеристик топливных частиц, осевших на поверхности проб БАВ. Методика позволила определить распределения топливных частиц по скорости счета бета- излучения с поверхности проб БАВ, по массе, по размерам и в конечном итоге по AD. В феврале-марте 1988 года были определены соответствующие распределения для двенадцати населенных пунктов зоны ЧАЭС. Пять из них – на первом следе на расстоянии от 8 до 30 км к западу от ЧАЭС.

Фоторадиометрическая методика (ФРМ) измерения размеров топливных частиц основывается на анализе радиографий, образованных координатно-зависимыми отпечатками бета- излучения проб БАВ на рентгеновской пленке. Для создания системы координат в трех углах пробы забивали гвозди, на которые надевали рентгеновскую пленку для получения контактных радиографий. Во время экспозиции для сохранения активного слоя поверхность пробы покрывали тонкой пленкой, практически прозрачной для бета- излучения и непрозрачной для альфа- излучения с поверхности пробы. Продолжительность первой экспозиции – 20 мин. Продолжительность последующих – 1 час, 3 часов, 27 часов и 81 час, т.е каждая последующая экспозиция была больше предыдущей в три раза. В местах пленки, находившихся над топливными частицами, при проявлении образовались характерные точечные почернения, которые фиксировались при просмотре радиографии в условиях одинаковой освещенности. Сопоставление отпечатков топливных частиц на последующих радиографиях обеспечило отсев ложных отпечатков и уверенное подтверждение существования «настоящих» на предыдущей радиографии.

Сущность ФРМ состоит в использовании каждой радиографии в качестве регистратора топливных частиц, бетаизлучение которых превышает некоторое пороговое значение, характерное для данного времени экспозиции, достаточное для обнаружения минимально заметного отпечатка топливной частицы на радиографии.

Исходная предпосылка предполагает, что все топливные частицы шарообразной формы, а р/н состав и значения удельной активности в них соответствуют значениям в таблице 1.

Значения скорости счета бета- частиц с $E_{\beta}>1020$ кэВ от топливных частиц, обусловивших появление отпечатков на 20 мин. радиографиях на всех двенадцати пробах БАВ, были измерены спектрометрическим детектором бетаизлучения, коллимированным до 5 мм. Измерения были проведены в январе 1988 г., к этому времени из «нелетучих» вклад в выбранном энергетическом диапазоне практически был обусловлен лишь ¹⁴⁴Ce=¹⁴⁴Pr (E_g =2996 кэВ), ¹⁰⁶Ru=¹⁰⁶Rh (E_g =3530 кэВ) и ⁹⁰Sr=⁹⁰Y (E_g =2273 кэВ) в их соотношениях из табл. 1. Из принятых допущений следует, что значения скорости счета бета- излучения «нелетучих» р/н для $E_{\beta}>1020$ кэВ пропорциональны массе, объему и соответственно кубу «цериевого» радиуса для 20 мин. радиографий, равное 5,34 мкм, соответствующее интервалу 6 в табл. 4 и табл. 5. Пороговые значения для интервалов 2, 3, 4, 5 были получены из соотношений значений времени экспозиций в них к интервалу 6. Значения скорости счета, превышающие верхний уровень для интервала 6, были распределены по интервалам 7, 8, 9 и 10. Радиографии 81 ч. были использованы только для корректировки 27 ч. радиографий. Вклады активности, обусловленные интервалами 1, определяли исходя из того, что интегральная форма логнормального распределения активности топливных частиц в вероятностно – логарифмических координатах должна быть прямой линией.

Таблица 4

инт	ервал	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
r	до	1,23	1,78	2,56	3,70	5,34	7,71	11,13	16,07	23,2	33,5
	ОТ	0	1,23	1,78	2,56	3,70	5,34	7,71	11,13	16,07	23,2
ř		0,78	1,48	2,13	3,06	4,41	6,34	9,12	13,1	19,8	27,0
V		1,95	13,6	40,5	120	359	1067	3177	9417	27833	82260
AD)	5,0	9,55	13,7	19,7	28,4	40,9	58,8	84,5	121	170
Ce	-144	0,35	2,5	7,3	21,7	65,0	193	575	1704	5037	14886

Характеристики аэрозолей топливных частиц, осевших на пробах БАВ.

г, мкм, - значение эффективного цериевого радиуса топливных частиц на нижнем *r*_{om} и верхнем *r*_{do} границах данного интервала размеров. Значения *r* рассчитаны исходя из того, что на 26.04.1986 года средняя удельная активность *p*/н Ce-144 в топливе составляла 1,74·10¹⁰ Бк/г при плотности 10,4 г/см³; ř, мкм, - среднее геометрическое значение эффективного цериевого радиуса для данного интервала размеров топливных частиц ř = $\sqrt{r_{om} \cdot r_{do}}$; для $r_{om} \ge 1,23$ мкм;

 $V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (\check{r})^3$, мкм³, - среднее геометрическое значение объема топливных частиц в данном интервале размеров;

 $AD = 2 \cdot \check{r} \cdot \sqrt{\frac{10,4}{1}}$, мкм, - аэродинамический диаметр топливной частицы с данным значением \check{r} ;

Ce-144, Бк, - активность радионуклида Ce-144 в топливной частице объемом V, мкм³ на 26.04.86 г.;

Таблица 5

Характеристики аэрозолей топливных частиц, осевших на пробах БАВ, отобранных по первому следу аварийных выпадений ЧАЭС на 26.04.1986 г.

L						Инте	ервалы				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
30	n		87	106	72	59	12	9	2		
	η	0,02	0,012	0,044	0,089	0,217	0,131	0,293	0,193		
25,4	n		9	29	24	20	6	4	3		
	η	0,01	0,0021	0,0197	0,0485	0,121	0,108	0,214	0,476		
19,6	n		191	107	101	81	18	12	9	2	
	η	0,02	0,0105	0,0172	0,048	0,116	0,0765	0,152	0,338	0,222	
18,5	n		82	87	82	65	28	15	11	1	1
	η	0,01	0,0034	0,0106	0,030	0,070	0,090	0,143	0,312	0,084	0,248
8,1	n		68	25	38	20	20	13	13	1	
	n	0.008	0.0041	0.0044	0.020	0.031	0.093	0 181	0.536	0.122	

L, км, - расстояние от ЧАЭС до места отбора данной пробы БАВ по следу первого аварийного выброса;

n – количество топливных частиц в данном интервале размеров на данной пробе БАВ;

п, отн. ед., - вклад активности радионуклида Се-144 в данном интервале размеров в активность Се-144 в данной пробе БАВ.

Таблица 6

Основные характеристики выпадений топливных частиц на расстоянии L км от реактора по пробам БАВ и по результатам измерений «лавочек» по первому следу.

							2
L, км,	30	25,4	19,6	18,5	13,8	8,1	4,6
AMAD, мкм	41	59	65	70	-	95	-
AD<34 мкм	0,382	0,201	0,204	0,124	-	0,068	-
m, г/км²,	100	230	330	220	150	580	2100
AD<34 мкм m, г/км ² ,	0,382 100	0,201 230	0,204 330	0,124 220	- 150	0,068 580	- 2100

АМАД, мкм, - значение, рассчитанное для топливных частиц, осевших на поверхности данной пробы БАВ, исходя из постулирования логарифмически нормального распределения размеров осевших частиц;

AD<34 мкм — вклад активности *p/н Ce-144* в топливные частицы, характеризующиеся AD<34 мкм к общей активности *p/н Ce-144* в данной пробе БАВ;

т, г/км², - плотность выпадения топливных частиц в месте отбора пробы БАВ и, или на данном расстоянии от ЧАЭС.

В соответствии с распределением энерговыработки по АЗ к моменту аварии ~25% ТВС характеризовались удельной активностью радионуклида Ce-144 меньшей, чем 1,74·10¹⁰ Бк/г. Таким образом, проведенная оценка AMAD в первичном выбросе топливных частиц по их активности является минимальной.

На рис. 4 – графическое представление данных, приведенных в табл. 6. Результаты исследований выпадений показали, что значения размеров топливных частиц в первичном выбросе были существенно больше, чем при AMAD=15 мкм.



Рис. 4 – графическое представление данных, приведенных в табл. 6

6 Ингаляционные поступления

Всего в больницу № 6 сразу после аварии поступили более ста человек, находившихся в помещениях АЭС и вблизи них в момент катастрофы. За 3 месяца пребывания в больнице из них умерли 25 человек, - трое спустя 86, 91 и 96 суток после аварии, и 22 человека за время от 14 суток до 34 суток [6].

В табл. 7 и табл. 8 приведены результаты обработки данных измерений по людям, умершим в больнице весной и летом 1986 г. В табл. 7 – по людям, оказавшимся в момент аварии в станционных помещениях, а в табл. 8 – вне станционных помещений (в первую очередь пожарные).

Из данных, приведенных в табл. 7 и табл. 8, не видно каких-либо явных причин, которые могли бы обусловить столь значительные отличия в продолжительности жизни после аварии группы из трех человек (отмечены значком *) от остальных двадцати двух. В то же время представляется очевидным, что столь значимая разница является следствием каких-либо важных причин. Поэтому далее пока рассматривается только группа из двадцати двух человек.

Таблица 7

N⁰	ΦИΟ	τ,	ПГр	$I 10^4 \Gamma_{r}$	<i>Cs</i> 137	Ru103	Ru106	<i>Cs</i> 137	Zr95	Ce141	<i>I</i> 131
п/п	Ψ. Π. Ο.	сут.	д, тр	L, 10 DK	<i>Cs</i> 134	<i>Ru</i> 106	Ce144	Ce144	Ce144	Ce144	<i>Cs</i> 137
1	AAΦ	16	8,9	3,8	2,46	4,9	0,72	0,15	1,83	1,69	_
2	БАИ	24	9,3	0,38	5,7	8,9	0,38	0,12	1,72	1,87	67
3	БВС	18	11,0	2,4	1,92	4,0	0,69	0,20	1,88	1,63	15
-	ВЮА*	86	7,5	3,2	3,33	4,2	0,41	0,065	1,19	2,02	-
4	ДВМ	23	1,9	24	2,35	7,5	0,56	0,95	2,0	1,87	6
5	КАГ	18	4,7	12	2,15	4,53	0,53	0,069	1,72	1,49	16
6	КАХ	16	4,7	76	2,47	5,76	0,46	0,34	1,94	1,78	3,5
7	ЛВИ	21	5,5	11	1,7	4,49	0,56	0,059	1,88	1,56	31
-	HAB*	91	10,1	1,7	2,46	5,23	0,45	0,056	1,35	1,67	_
8	ПГИ	17	6,4	0,43	2,63	1,44	1,83	0,33	0,90	0,74	-
9	ПВВ	21	6,1	2,8	2,41	4,73	0,63	0,26	1,64	1,49	17
10	ПКГ	24	8,2	1,7	2,92	4,29	0,56	0,10	1,81	1,57	_
11	ΤЛΦ	18	11,8	3,1	1,68	3,28	0,78	0,13	1,72	1,50	11

Данные по людям, оказавшимся во время аварии в помещениях АЭС

Таблица 8

Данные по людям, оказавшимся во время аварии вне помещений АЭС

№ п/п	Ф. И. О.	τ,	Д. Гр	L. 10 ⁴ Бк	<i>Cs</i> 137	Ru103	<i>Ru</i> 106	<i>Cs</i> 137	<i>Zr</i> 95	Ce141	<i>I</i> 131
11/11		Сут.		_,	<i>Cs</i> 134	Ru106	Ce144	Ce144	Ce144	Ce144	<i>Cs</i> 137
1	BHB	19	12,1	0,088	3,46	5,0	1,27	0,52	2,1	1,70	18
2	ИЕА	30	8,3	0,43	3,6	3,7	0,13	0,13	1,5	1,46	-
3	ИВИ	17	12,0	0,081	2,46	2,8	0,73	0,73	1,5	1,44	19
4	КВН	15	11,1	0,059	3,56	3,61	4,0	1,48	-	-	33
5	КЮИ	32	6,7	1,07	1,93	4,53	0,72	0,1	1,75	1,59	-
-	ЛКИ*	96	4,1	1,01	3,33	5,74	0,25	0,05	1,34	1,77	-
6	ОИЛ	17	12,7	0,58	2,61	3,46	0,87	0,13	1,59	1,38	16
7	ПВП	15	13,7	0,41	2,71	4,22	0,73	0,63	1,78	1,59	10
8	СВИ	25	6,6	0,106	1,2	9,9	0,37	0,37	1,48	2,72	-
9	ТВИ	14	10,9	0,052	2,47	-	0,53	0,21	-	-	12
10	THH	20	12,5	0,21	3,15	5,75	0,46	0,20	1,08	-	35
11	CAA	34	4,4	0,046	2,2	-	_	0,087	_	1,67	_

т, сут. – продолжительность жизни после аварии;

Д, Гр – персональное значение поглощенной дозы по пробам крови, отобранным и измеренным в больнице в течение нескольких дней после аварии;

L, Бк – измеренное значение активности p/н Ce-144 в легких, приведенное по распаду и по выведению (по данным рис. 5) к моменту аварии – активность p/н Ce-144 в респирабильной фракции размеров топливных частиц;

 $\frac{c_{s137}}{c_{s134}}$ и т. д. – значения характерных отношений активности p/н, депонированных в легких, приведенные по распаду на момент аварии.

Значения на момент смерти активности р/н, депонированных в легких, были получены путем измерения активности р/н в пробах тканей легких на ППД гаммаспектрометре. От легких каждого человека было отобрано по определенной схеме по 15 точечных проб, в каждой из которых были измерены значения удельной активности депонированных р/н. Значения отношений в табл. 7 и табл. 8 получены усреднением измеренных точечных значений удельной активности в легких каждого человека. Значение массы легких было принято равным 1400 г.

По существу, таким образом, были получены на момент смерти значения активности топливных частиц, депонированных в альвеолярной области легких (респирабельной фракции). Приведение к моменту поступления проводили по распаду и в соответствии с очисткой альвеолярного отдела согласно [12], представленного на рис. 5.



Рис. 5 – зависимость активности долгоживущих р/н в легких от времени после однократного поступления нерастворимых аэрозолей (тип соединения при ингаляции М) для разных значений AD [12].

Интервалы значений времени дожития, $\tau = (14 \div 32)$ сут., для людей, оказавшихся в момент аварии на АЭС вне станционных помещений, и для людей в помещениях АЭС - $\tau = (15 \div 22)$ сут., характерны для кишечной формы острой лучевой болезни (ОЛБ) [13].

С наибольшей достоверностью этому диагнозу соответствуют пострадавшие, фигурирующие в табл. 8 и рис.6 под № 1; 3; 4; 6; 7; 9; 10, τ =(14÷20) сут. и в табл. 7, рис. 7 – под № 1; 3; 5; 6; 7; 8; 11, τ =(15÷21) сут.

При этом интервал измеренных значений дозы Д оказался, (11÷14) Зв для людей вне станционных помещений при среднем значении \overline{A} =12,1 Зв и медиане ^мД=12,1 Зв. В то время как для людей в помещениях \overline{A} =7,4 Зв и ^мД=6,0 Зв.

Сопоставление значений дозы и продолжительности жизни показывает, что при одинаковой продолжительности жизни после аварии значения дозы по гематологии Д, полученной в помещениях АЭС, примерно в полтора раза меньше значений дозы Д, полученной вне помещений.

Конечно, когда имеешь дело с результатами измерений проб биологического происхождения, всегда следует помнить, что «использование результатов измерений неопределенной точности зачастую может явиться источником эмпирической дезинформации» (неизвестный автор).

В табл. 9 приведены средние и медианные значения распределений по данным табл. 7, табл. 8 и по расчетным данным из табл. 1, значения активности радионуклида Ce-144 в легких, а также средние и медианные значения отношений активности р/н в легких людей, оказавшихся в момент аварии внутри и вне станционных помещений.

Радионуклидные характеристики аэрозольных распределений

	<i>q</i> ,10	⁴ Бк	Cs1 Cs1	.37 .34	Ru1 Ru1	03	Ruí Cei	106 144	Cs1 Ce1	37 44	Zr Ce1	95 .44	Ce1 Ce1	L41 L44	$\frac{11}{Cs1}$	31 37
	$q_{cp} \Delta$	q _м	r_{cp}	r _M	r_{cp}	r _m	r_{cp}	r _M	r_{cp}	r _M						
Табл.	10,9	3,3	2,63	2,4	4,9	4,5	0,66	0,56	0,22	0,16	1,66	1,7	1,61	1,56	21	17
7	18		0,99		1,8		0,36		0,24		0,31		0,30		19	
Табл.	0,35	0,1	2,72	2,5	4,8	4,5	0,91	0,6	0,39	0,2	1,57	1,5	1,7	1,59	20	18
8	0,35		0,70		2,0		1,0		0,39		0,27		0,38		9	
Табл.			1,90		3,87		0,31		0,064		1,4		1,4		8,8	
1																

q_{cp} и Д, [Бк] – среднее значение и СКО распределений активности р/н Се-144 в легких по данным таблицы 7 и таблицы 8;

q_м, [Бк] – медианные значения распределений активности Ce-144 в легких по данным таблицы 7 и таблицы 8;

 r_{cp} и Δ – средние значения и СКО соответствующих отношений p/н по данным таблицы 7 и таблицы 8;

*r*_м – медианы.

Анализ данных, приведенных в табл. 9, позволяет сделать следующие выводы:

- в целом значения р/н отношений $\frac{Cs137}{Cs134}$, $\frac{Zr95}{Ce144}$, $\frac{Ce141}{Ce144}$ и их разбросы свидетельствуют о достаточно высокой достоверности результатов измерений активности р/н в пробах легких. Особо следует подчеркнуть достоверные отличия цезиевых отношений от расчетных топливных, что еще раз подчеркивает преимущественное диспергирование «молодого» топлива при взрыве;

- р/н составы активности в легких пострадавших, фигурирующие в табл. 7 и табл. 8, одинаковы и обусловлены ингалированием одной аэродисперсной системы;

- значения активности р/н Ce-144 и Zr-95, осевших в легких, полностью обусловлены ингалированием топливных частиц;

- поступление активности в легкие в виде топливных частиц людям, находившимся в станционных помещениях, оказалось в среднем в ~30 раз больше, чем поступление людям, находившимся вне станционных помещений. Это обстоятельство позволяет предположить возможность неучтенного вклада в значения дозы, полученной людьми в помещениях, за счет ингаляционного поступления топливных частиц.

7 Оценка значений дозы внутреннего облучения, обусловленного поступлением топливных частиц.

В табл. 10 приведены расчетные значения дозовых коэффициентов на различные отделы органов дыхания и ЖКТ. Расчеты приведены в рамках принятых в настоящее время представлений [12] для поступления топливных частиц, характеризующегося логарифмически нормальным распределением размеров с AMAD=10 мкм и β_g =1,5.

В таблице представлены значения эквивалентной дозы, накопленной соответственно за первые сутки, за первую неделю и за первый месяц после поступления. Значения дозы нормированы на 1 Бк р/н Се-144 в частицах диспергированного топлива с р/н составом из табл. 1.

Таблица 10

Значения накопленной эквивалентной дозы Д от α- и β-излучений за 1; 7 и 30 суток после однократного поступления на различных отделах ЖКТ и органов дыхания, обусловленной ингаляцией аэрозолей топливных частиц с AMAD 10 мкм в единицах 10⁻⁸ Зв/Бк_{Се-144}.

_													
(Сут.	α, β	stwall	siwall	uliwall	lliwall	colon	et1	et2	bbsec	bbbas	Bb	ai
			Ж	Т	ВТК	НТК	ТК	Н	Г]	6	ТБ	А
	1	β	0,55	1,3	5,0	5,1	5,0	3100	8,1	6,0	4,7	1,3	0,36
		α	-	-	-	-	-	350	0,13	1,9	0,32	0,62	0,031
	7	β	0,59	1,5	6,5	16	11	4500	11	20	16	4,5	1,7
		α	-	-	-	-	-	560	0,58	9,3	1,8	2,5	0,21
	30	β	0,62	1,5	6,6	16	11	4500	13	41	32	9,7	4,7
		α	-	-	-	-	-	560	2,1	26	5,3	6,6	0,75

сут. – интервал времени с момента аварии;

 α , β – вклады α - и β -излучающих радионуклидов, соответственно

Ж – желудок;

Т – тонкий кишечник; ВТК – верхний отдел толстого кишечника; НТК – нижний отдел толстого кишечника; ТК – расчет на 0,57 ВТК+0,43 ·НТК H – носовая полость, рот; Γ – носоглотка, глотка, гортань; Б – бронхиолы; ТБ – трахея и бронхи; A – альвеолы.

Особенности физиологии пищеварения позволяют считать, что значения дозы на органы пищеварения от α-излучения р/н, заключенных в топливных частицах, пренебрежимо малы по сравнению со значениями дозы от β-излучения.

Значения дозовых коэффициентов на область Н обусловлены отсутствием стандартного «физиологического» способа очистки носовой полости от поступившей пыли. Если для Г это заглатывание со слюной, для Б и ТБ – мукоцилеарный транспорт, - т.е. «автоматические» действия, не контролируемые сознанием, то для Н – сморкание, сдувка при чихании, кашле и выдохе, эффективность которых зависит и от интенсивности секреции жидкости, обусловленной степенью раздражения (поражения) чувствительных клеток желтого пятна, карины и т.д. Конечно, преимущественное отложение топливных частиц наибольших размеров и соответственно активности должно обусловить относительно наибольшее значение дозового коэффициента для Н по сравнению с другими отделами органов дыхания, но насколько больше – непонятно. Так что скорее всего следует ограничиться соображением, что дозовый коэффициент на Н – самый большой.

Топливные частицы не растворяются в жидкостях организма, поэтому соотношения дозовых коэффициентов на тонкий (Т) и толстый кишечник (ТК) не зависят от AMAD. Из данных, приведенных в табл. 10 следует, что за счет ингаляции топливных частиц через 7 суток после поступления накопленная доза на ТК в 7,3 раза больше, чем накопленная доза на Т.

Тонкий кишечник состоит из двенадцатиперстной, тощей и подвздошной кишок, общей длиной (2,3÷3,8) м. Время пребывания порции содержимого в тонком кишечнике ~4 часа. Стенка тонкой кишки образована слизистой оболочкой, подслизистой основой и серозной оболочками. Через слизистую оболочку происходит диффузия и ферментативный транспорт питательных веществ из содержимого кишечника в жидкости организма [14; 15].

Поверхность слизистой оболочки тонкой кишки характеризуется рельефом, образуемым наличием целого ряда анатомических образований: циркулярных складок, ворсинок и кишечных желез или крипт.

Пройдя за 4 часа тонкий кишечник, порция содержимого попадает в толстый кишечник (ТК) – оконечную часть ЖКТ у человека. В ТК происходит окончательное всасывание упрощенных веществ и воды в кровь. Непереваренные лишние вещества формируют каловые массы и выходят из организма. Длина ТК составляет (0,9÷1,3) м, а время пребывания содержимого ~36 часов.

Слизистая оболочка ТК лишена ворсинок, но в ней много складок, образованных слизистой оболочкой, подслизистой основой, а также значительно большее количество крипт, чем в слизистой оболочке тонкой кишки, они крупнее и их длина достигает 0,7 мм.

Наряду с механическим воздействием, слизистая оболочка кишечника находится в постоянном взаимодействии с химически активной средой содержимого кишечника. В этих условиях время жизни функциональных клеток слизистой оболочки составляет около 3 сут. Постоянное возобновление популяции функциональных клеток слизистой оболочки обеспечивают воспроизводящие клетки, расположенные на дне крипт.

Данные измерений, приведенные на рис. 6, позволяют сделать заключение о том, что однократная доза внешнего фотонного излучения 12 Зв является абсолютно летальной для популяции воспроизводящих клеток слизистой оболочки именно тонкого кишечника, поскольку для ТК даже доза 20 Гр приводит к серьезным (тяжелым) последствиям лишь у 5% облученных людей [16].



Рис. 6 – Регрессия τ=τ_(Д), построенная по данным, приведенным в табл. 8 (по людям вне помещений АЭС).



Рис. 7 – графическое представление данных, приведенных в табл. 7 (по людям в помещениях АЭС), прямая линия – регрессия **т**=**т**_(Д) из рис. 6.

В табл. 7 и табл. 8 содержатся измеренные значения величин, использование которых позволяет проведение оценок индивидуальных дозиметрических характеристик, обусловленных ингаляционным поступлением погибшим людям топливных частиц в течение первых минут ÷ десятков минут после взрыва. В числе этих величин – значения времени дожития τ [сут.] и прижизненные измеренные значения дозы по гематологии Д, Зв.

На рис. 6 в графической форме представлены индивидуальные значения дозы Д, Зв, по гематологии и соответствующие им значения т, сут, - продолжительности жизни после аварии по данным табл. 8 для людей вне помещений АЭС.

Цифры около точек – номера № п/п из табл. 8.

Прямая линия – феноменологическая зависимость $\tau = \tau_{(\mathcal{A})}$ продолжительности жизни τ от значений дозы Д, построена для людей, находившихся вне помещений АЭС, т. е. по данным табл. 8.

Из выводов раздела 6, следует, что для людей, оказавшихся в момент аварии вне помещений, значения дозы Д в основном обусловлены внешним фотонным излучением. В рамках этого предположения можно считать, что на рис. 6 представлена зависимость времени дожития τ от дозы внешнего излучения.

Попытка построения подобной регрессии для людей, оказавшихся в помещении АЭС, табл. 7, рис. 7 выявила, что при одинаковом времени дожития для семерых из одиннадцати погибших людей, оказавшихся в помещениях, значение дозы Д было существенно (до нескольких раз) меньше, чем вне помещений («дефицит» дозы Δ). В то же время, для тех же людей значение посмертной активности топливных частиц в лёгких оказалось до нескольких десятков раз больше, чем вне помещений.

Так что вполне резонно было предположить, что «дефицит» дозы Δ был «восполнен» внутренним облучением, обусловленным ингаляцией топливных частиц, а индивидуальные значения «дефицита» дозы являются значениями дозы на тонкий кишечник (Δ_T), обусловленные ингаляцией топливных частиц.

На рис. 7 в том же формате, как и на рис. 6, представлены данные из табл. 7, т. е. по людям, находившимся в помещениях АЭС, а прямая взята из рис. 6. На рис. 7 представлен пример получения значений $\Delta \tau$ и Δ по данным пострадавшего, обозначенного в табл. 7 под № 7, здесь $\Delta \tau = \tau_1 - \tau_2 = 10$ сут, а $\Delta_T = \mathcal{I}_2 - \mathcal{I}_1 = 4,8$ Зв.

Из данных, приведенных на рис. 7 видно, что для всех пострадавших, фигурирующих в табл. 7, кроме №2 и №11, продолжительность жизни, соответствующая данному значению дозы, на $\Delta \tau$ меньше, чем следует из зависимости $\tau = \tau_{(Д)}$, и значение дозы, соответствующее данному значению продолжительности жизни на Δ_T меньше, чем следует из зависимости $\tau = \tau_{(Д)}$.

Результаты совместной обработки данных из табл. 7 и рис. 7 по людям, находившимся в помещениях, приведены в табл. 11.

Таблица 11

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
τ, сут	16	24	18	23	18	16	21	17	21	24	18
Д, Зв	8.9	9.3	11.0	1.9	4.7	4.7	5.5	6.4	6.1	8.2	11.8
$\Delta \tau$, сут	8	0	2	-	14	17	10	12	9	1	0
Δ _т , Зв	3.8	0	0.8	7.5	7.0	8.0	4.8	5.7	4.3	0.7	0
П, 10 ⁸ Бк	2.5	0	0.5	5.0	4.7	5.3	3.2	3.8	2.9	0.5	0
Δ_{TK} , 3b	27.5	0	5.5	55	52	58	35	42	32	5.5	0
Д+ Д _Т , Зв	12.7	9.3	11.8	9.4	11.7	12.7	10.3	12.1	10.4	8.9	11.8
Д+ Д _{ТК} , Зв	36	9.3	16.5	57	57	63	42	48	38	14	12
Д _г , Зв	40	9.3	16	65	63	71	46	54	42	14	11.8
Π/L	6600	-	2100	2100	3900	700	2900	8800	1000	2900	-
									0		
AMAD, мкм	200	-	120	120	165	75	140	~300	~300	140	-

№ п/п – номер пострадавшего, і, в табл. 7;

Д, Зв – доза по гематологии;

*∆τ*_{*cym*} – «уменьшение» времени дожития из рис. 7;

Д_Т, Зв – «дефицит» дозы из рис. 7;

 Π , $Б\kappa$ – активность p/H^{144} Се в ингаляционном поступлении топливных частиц данному человеку;

∆_{TK}, Зв – доза на ТК, обусловленная ингаляционным поступлением;

 $A + \Delta_T$, 3в – суммарная доза на область T;

 $A + \Delta_{TK}$. Зв – суммарная доза на ТК;

Д_Г, Зв – суммарная доза на отдел Г;

П/L – значения отношения отложения в верхних дыхательных путях к отложению в альвеолярной области, рассчитанные по данным, приведённым в табл. 11 и табл. 7;

АМАД, мкм – значения *АМАД*, соответствующие значениям П/L согласно табл. 12.

На рис. 8 приведены основополагающие зависимости оседания аэрозолей на различных отделах органов дыхания в зависимости от AMAD [12]. Эти же данные лежат в основе результатов расчётов, выполненных в соответствии с рекомендацией [3], и приведенные в табл. 12.

Из данных на рис. 8 следует, что значения дозовых коэффициентов на область органов дыхания Г, принятые для AMAD=10 мкм, остаются практически постоянными для топливных частиц с размерами, превышающими AD=3 мкм.

С учетом результатов, приведенных в табл. 10 для 7 суток после поступления, индивидуальное поступление активности топливных частиц составляет

 $\Pi_i = \frac{(\Delta_T)_i}{1.5 \cdot 10^{-8}} \ (^{144}\text{Ce}, \,\text{Бк});$

значение дозы на ТК для данного пострадавшего (Дтк)_i=Д_i+(Δ_{TK})_i = Д_i + П_i·11·10⁻⁸ Зв и значение дозы на отдел Г органов дыхания для пострадавшего «i» из табл. 7

 $(\Box \Gamma)_i = \Box_i + \Box_i \cdot (13 + 2, 1) \cdot 10^{-8}$ 3B.



Рис. 8 – Зависимости депонирования аэрозолей в различных отделах органов дыхания от AMAD частиц [12].

Таблица 12

Значения отношения активности частиц с равномерным распределением р/н по объему, оседающих в верхних отделах дыхательного тракта и в альвеолярном отделе легких в зависимости от AMAD [3].

АМАД, мкм	$\Pi/L = (ET2+BB+bb)/AI$
200	7152
100	1593
50,0	287
20	48
10	18,6
5	8
1	1,8

При этом, проводя какие-либо заключения на основе использования индивидуальных значений измеренных величин, нельзя забывать о том, что их значения были подвержены воздействию многих причин, не поддающихся учету. Так, например, для дозы на ТК:

- распределение активности топливных частиц по объему вещества в ТК;

- слой слизи, покрывающий поверхность ТК;
- пил воду или не пил;
- когда последний раз ел;
- ужинал с алкоголем или без оного;
- пользовался СИЗ во время аварии или нет и т.д. и т.п.

Пожалуй, единственное, чего быть не могло – при сравнительно небольших значениях величины L не могло быть существенного «дефицита» дозы Δ_{T} . В этом смысле положение точек № п/п 2, 3,10 и 11 из табл. 7 на рис. 7 – в основном «на месте», т.е. практически на регрессии.

Вообще говоря, между расчетными оценками возможных значений дозы внутреннего облучения, обусловленной ингаляционным поступлением топливных частиц сразу после взрыва, и результатами измерений на людях – «дистанция огромного размера». Понятное дело, что гораздо ближе к «истине» находятся дозовые оценки, основанные на «человеческих» данных, а исследования выпадений призваны оценить причины и следствия, определившие судьбу пострадавших. В этом плане наряду с ингаляцией топливных частиц представляется необходимым оценить возможный вклад в значения дозы внутреннего облучения ингаляционных поступлений «горячих» частиц и «свободных» атомов.

8 Оценка значений дозы внутреннего облучения, обусловленных поступлением «горячих» частиц

Наличие рутениевых аэрозолей, как возможный существенный фактор радиационной опасности, было отмечено сотрудниками ИФХ имени Л.Я. Карпова летом 1986 года при проведении исследований аэрозолей на развале четвёртого блока.

Особый интерес к активности р/н 103 Ru и 106 Ru в аварийных выпадениях появился в начале лета 1987 года. Установилась летняя жаркая погода, и при измерении активности аэрозольных фильтров, экспонированных над развалом реактора, было обнаружено аномальное увеличение объёмной активности р/н 106 Ru в воздухе. По сравнению с прошедшей зимой 1986÷1987 гг. объёмная активность р/н 106 Ru возросла в десятки раз. Одновременно снова набрала силу «эпидемия» чернобыльского кашля, ослабевшая было зимой, но в 1988 г. ситуация повторилась лишь в начале лета. Вообще говоря, нельзя сказать, что летом 1986 года не было попыток объяснить причину кашля, но гипотезы носили умозрительный характер, и сейчас о них не стоит и вспоминать (кашляли все: я закашлял в августе 1986 года в жаркую погоду, когда занимался измерениями с помощью переносного альфа-радиометра скорости счёта альфа-частиц над поверхностью почвы на улицах г. Чернобыль, и покашливаю по сию пору).

У рутения есть оксид RuO₄, у которого температура плавления +25,5 °C, кипения – +27 °C, а температура разложения +108 °C [17]. Таким образом, появилось объяснение рутениевых аномалий, измеренных 15÷16 мая 1986 года в Березинском биосферном заповеднике и в Финляндии 10÷12 мая 1986 года [18; 19]. Непонятным оставалось только, каким образом и когда рутений выбрался из топливной матрицы и образовал RuO₄.

Первичный аварийный выброс днём 27.04.1986 достиг Швеции. Измерения активности и р/н состава аэродисперсных проб, отобранных 27.04, наряду с топливными частицами, атомами и молекулярными соединениями р/н «летучих» элементов (йод, цезий, теллур и т.д.) [20], выявили на фильтрах наличие «горячих» частиц р/а аэрозолей, активность которых в основном определялась р/н ¹⁰⁶Ru = ¹⁰⁶Rh и ¹⁰³Ru в их расчётном на момент аварии реакторном соотношении. Исследования «горячих» частиц на электронном микроскопе показали, что частицы были каплевидной формы. Диаметр у большинства из них 1 мкм, но были частицы и существенно большего размера, на соответствующем снимке, помещённом для примера [21], были представлены две характерные частицы сферической формы диаметром 2,5 мкм и 3,3 мкм. В таблице 13 представлены откорректированные нами р/н характеристики других трёх частиц, результаты измерений которых тоже приведены для примера. В оригинале, вместо р/н ¹⁰⁵Rh фигурирует невозможный в данном контексте р/н ⁵¹Cr, перепутаны р/н ¹⁴¹Ce и ¹⁴⁴Ce, а также для

частицы № 3 нами рассчитан и добавлен в таблицу р/н ¹⁰³Ru. Под № 3 в табл. 13 приведены результаты измерений единственной «горячей» бариевой частицы.

таолина тэ	Таблина	13
------------	---------	----

Частица №	•		
р/н	1	2	3
¹⁰³ Ru, Бк	10000	6900	155*
¹⁰⁶ Ru, Бк	2800	1800	40
¹⁰⁵ Rh, Бк	1700*	-	-
⁹⁹ Мо, ^{99т} Тс, Бк	1600	-	-
¹³² Те, Бк	810	20	-
¹³¹ I, Бк	70	60	25
¹⁴⁰ Ва, ¹⁴⁰ Lа, Бк	-	-	2400
⁹⁵ Zr, ⁹⁵ Nb, Бк	-	-	10
¹⁴⁴ Се, Бк	-	-	75*
¹⁴¹ Се, Бк	-	-	120*
²³⁹ Np, Бк	-	-	70

Результаты измерений активности трёх «горячих» частиц, отобранных в Швеции и измеренных 28÷30 апреля 1986 гола.

Отсутствие более полных сведений о бариевых «горячих» частицах, по-видимому, обусловлено тем, что ко времени начала специальных работ по поиску и исследованию «горячих» частиц короткоживущая система $p/h^{140}Ba = {}^{140}La$ успела полностью исчезнуть за счёт p/a распада.

Спустя год, в трёх различных пунктах в Швеции (Stocholm, Gävle, Gotland) были проведены тщательные поиски «горячих» частиц чернобыльского происхождения на определённых участках местности. В итоге было найдено 23 частицы, активность которых практически полностью определялась р/н 106 Ru = 106 Rh и 103 Ru (рутениевые частицы) в их расчётном реакторном соотношении. В табл. 14 приведены результаты измерений пяти рутениевых частиц на 28.04.1986.

Суммарная удельная активность топлива на момент аварии составляла ~1 Бк/мкм³, поэтому из результатов исследований, приведённых в табл. 14, становится понятным, почему рутениевые частицы фигурируют как «горячие» [20].

Исследование элементного состава рутениевых частиц показало, что найденные рутениевые частицы «изготовлены», в основном, из молибдена, рутения и родия. На тех же участках местности были найдены чернобыльские топливные частицы, р/н состав активности которых соответствует предаварийному топливу. Причём топливных частиц на той же площади обнаружили и собрали в 10 раз больше, чем рутениевых.

Это «соотношение» согласуется с результатами работ, проведённых в ИАЭ им. И. В. Курчатова в 1987 году по исследованию проб, отобранных в помещениях объекта «Укрытие» и проб почвы из 30 километровой зоны. Из общего количества исследованных в ИАЭ частиц, характеризующихся активностью более нескольких десятков Бк, основной вклад, свыше 90%, составляли топливные частицы. Примерно $(4\div7)$ % - вклад частиц, активность которых на момент измерения (1988 г.) более чем на 95 % была обусловлена ¹⁰⁶Ru. Что касается р/н состава топливных частиц, то при их поштучном измерении обнаружился «дефицит» цезия, в отдельных частицах доходивший до 80 % от его усредненного по реактору цериевого отношения из табл. 1. В среднем обеднение цезием составило ~50 %, а рутением ~ 20 % [22].

тосле аварии										
№ п/п	1	2	3	4	5					
Параметры частиц	Haga1	Guan1	Guan2	Haga9	Gävle 3					
Изотопный состав	Активность Бк/частицу									
¹⁰³ Ru	17400	39300	31800	3600	7900					
¹⁰⁶ Ru	4350	9830	9430	830	1880					
¹²⁵ Sb	3,8	26	15	1,3	_					
⁶⁰ Co	1,7	7	3,1	0,1	_					
¹⁴⁴ Ce	_	57	_	_	_					
¹³⁷ Cs	0,4	_	_	_	_					
Диаметр, мкм	9,0	11,5	10,7	_	_					
Аэрод. диаметр, мкм	29	37	_	_	_					
Плотность, г/см ³	10,3±1	10,7±1	_	-	_					

4,2

50

46

Результаты исследований пяти «горячих» частиц, обнаруженных в Швеции спустя год г

Форма рутениевых частиц, размеры и элементный состав позволили предположить их образование в активной зоне (АЗ) во время кампании реактора из атомов металлов – ПД с массовым числом от 95 до 118 (без 96-й цепочки). Соответствующая сумма значений выхода этих цепочек на одно деление – 0,51. Была проведена проверка предположения о происхождении «горячих» частиц. Среднее выгорание в АЗ перед аварией составляло 10,9 $\frac{\text{MBт сут.}}{\text{кг (урана)}}$ =9,42·10¹¹ $\frac{\text{Дж}}{\text{кг (урана)}}$ [23].

При энерговыделении 199 МэВ/дел среднее число делений:

2,5

49

Скорость

осаждения, см/с ¹⁰³Ru, Бк/мкм³

$$\frac{9,42\cdot10^{11}\cdot10^{-3}}{1,99\cdot10^2\cdot1,6\cdot10^{-13}} = 3,0\cdot10^{19}\,\text{der.}/_{\Gamma\text{ (урана)}}$$

На момент аварии среднее удельное содержание р/н ¹⁰⁶Ru в топливе было 3,7·10⁻⁵ ^г/_г (урана) [23]. Отсюда, значение средней удельной активности р/н ¹⁰⁶Ru при λ=2,15·10⁻⁸с⁻¹:

3,7·10⁻⁵·
$$\frac{6,02\cdot10^{23}}{106}$$
·2,15·10⁻⁸=0,45·10¹⁰ Бк/_{г (урана)},

и за время кампании количество делений, пришедшихся на 1 Бк р/н ¹⁰⁶Ru, составило в среднем:

$$\frac{3,0\cdot10^{19}}{0.45\cdot10^{10}}$$
 =6,7·10⁹ дел./_{Бк (106 Ru}

Таким образом, при среднем значении массового числа осколков деления указанных цепочек М=99 [24] значение массового выхода металлов на одно деление к 26.04.1986:

и, соответственно, расчётное значение массового выхода на 1 Бк р/н $^{106} \rm Ru:$

Таблица 14

$$\theta = 6,7 \cdot 10^9 \cdot 8,39 \cdot 10^{-23} = 5,6 \cdot 10^{-13} \text{ G}_{\text{K}}(^{106}\text{Ru})$$

С другой стороны, среднее значение массового выхода на 26.04.1986 было рассчитано по данным измерений трёх частиц, приведённых в табл. 14 (Haga 1, Guen 1, Guen 2), и оказалось равным:

$$\theta = (8,3\pm0,9)\cdot10^{-13} \, \text{G}_{\text{K}}(^{106}\text{Ru})$$

Полученные независимо друг от друга расчётное и измеренное значения массового выхода совпадают в пределах 15%, т.е. оказались достаточно близки друг от друга. Это подтверждает правильность предполагаемого происхождения «горячих» частиц.

На микрофотографиях «горячие» частицы имеют явно выраженную каплевидную форму, свидетельствующую о том, что они образовались из расплава и локализовались в межгранулярном пространстве топливных таблеток при нормальной доаварийной эксплуатации реактора.

Образование инклюзий происходило за счёт выхода атомов ПД из топливной матрицы в центральной, наиболее разогретой области топливных таблеток на протяжении всей кампании реактора. При этом отсутствие значимых количеств «летучих» ПД в рутениевых и бариевых инклюзиях обусловлено фракционированием за счет миграции свободных атомов к «холодной» периферии таблеток с последующим локализованным «замерзанием» элементов в зависимости от их температуры плавления и градиента температуры по радиусу топливной таблетки. Этим объясняется разделение рутения с барием и практическое отсутствие «летучих» в пробах «горячих» частиц, отобранных в Швеции.

В табл. 15 представлены результаты измерений активности р/н ¹⁰⁶Ru для пяти частиц из табл. 14 (№ п/п 1, 2, 3, 4, 5), активности р/н ¹⁰⁶Ru или ¹⁰³Ru для двух частиц из табл. 13 (№ п/п 6 и 7) и измеренные значения диаметра 2,5 мкм и 3,5 мкм для двух частиц (№ п/п 8 и 9). Остальные значения активности р/н рутения и значения диаметра частиц, фигурирующих в табл. 14, получены расчётным путём при условиях - на 26.04.1986 $\theta = (8,3\pm0,9)\cdot10^{-13} r/_{Бк} (^{106}Ru)$, и $\rho = 10,5 r/cm^3$.

Таблица 15

P / 10 miles		ц, сонеру		meenege			[= ~, = +]			_
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
¹⁰³ Ru, Бк	17400	39300	31800	3600	7900	10020	6900	409	934	
¹⁰⁶ Ru, Бк	4350	9830	9430	830	1880	2800	1800	102	234	
d, мкм	8,7	11,4	11,2	4,98	6,5	7,5	6,4	2,5	3,3	
AD, мкм	26	34	34	15	19	23	19	7,5	10	

Значения активности, диаметра (d) и аэродинамического диаметра (AD) девяти рутениевых частиц, обнаруженных и исследованных в Швеции [20; 21]

На момент аварии общая активность р/н ¹⁰⁶Ru в предаварийном реакторе – 23,2 МКи, а р/н ¹⁴⁴Ce – 105 МКи, отсюда среднее значение отношения удельной активности ¹⁰⁶Ru к ¹⁴⁴Ce в топливе на момент аварии составляло – 0,22 [23]. Если q_т – удельная активность р/н ¹⁰⁶Ru в топливных гранулах на момент аварии, а

Если q_T – удельная активность p/н ¹⁰⁰Ru в топливных гранулах на момент аварии, а q_{cB} – «свободная» удельная активность p/н рутения, вышедшего из топливных гранул, то при измеренных значениях удельной активности p/н ¹⁰⁶Ru_{изм} и ¹⁴⁴Ce_{изм} соотношение свободного рутения и топливного:

$$r_{Ru} = {^{Ru106}q_{cB}} / {^{Ru106}q_{T}} = ({^{Ru106}q_{_{H3M}}} - 0,22 \cdot {^{Ce144}q_{_{H3M}}}) / 0,22 \cdot {^{Ce144}q_{_{H3M}}}$$

Нормировка на активность р/н ¹⁴⁴Се обусловлена тем, что как уже было отмечено, тугоплавкий церий является одним из самых «малоподвижных» элементов продуктов

^{Се144} q_{изм} – топливный маркер.

Аналогично для р/н ¹³⁷Сs отношение свободной активности к топливной:

$$\mathbf{r}_{\rm Cs} = \frac{C_{\rm S137}}{q_{\rm cB}} / \frac{C_{\rm S137}}{q_{\rm T}} = \left(\frac{C_{\rm S137}}{q_{\rm H3M}} - 0.032 \cdot \frac{C_{\rm Ce144}}{q_{\rm H3M}}\right) / 0.032 \cdot \frac{C_{\rm Ce144}}{q_{\rm H3M}}$$

Расчётное отношение удельной активности ${}^{137}Cs$ и ${}^{144}Ce$ в топливе – ${}^{Cs137}q_{T}/{}^{Ce144}q_{T} = 0,064.$

Значение r_{Cs} = 0,032 выбрано с учётом обеднения топливных гранул цезием до 50% за счёт выхода цезия из топлива.

Таблица 16

Соотношения r_{Ru} свободного и топливного в пробах из банка аэрозольных выпадений (БАВ), отобранных по разным направлениям от АЭС

направление	3*	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ
r _{Ru}	0,23	0,93	0,56	0,34	0,56	0,57	2,0
Δ	0,12	0,65	0,05	0,03	0,26	0,09	1,6
n	7	6	4	4	7	5	6

п – число проб в направлении;

∆ – среднеквадратичное отклонение (СКО).

Из данных табл. 16 видно, что на следе по направлению 3 (Запад), образованном непосредственно выпадениями взрыва реактора, вклад свободного $^{Ru106}q_{cB}$ в измеренное значение активности $^{Ru106}q_{H3M}$ наименьший – $r_{Ru} = 0,23$. В выпадениях на других направлениях, сформировавшихся позже за счёт образования и выноса аэрозолей из развала реактора, значение рутениевого отношения существенно больше – на направлении ЮЗ, сформировавшегося за счёт выпадений через 5 суток после взрыва, значение $r_{Ru} = 2,0$, то есть почти в 10 раз больше.

Результаты исследований чернобыльских выпадений в Швеции показывают, что в момент взрыва из межгранулярных пустот топлива высвободились металлические инклюзии и образовали в аэродисперсной системе первичного аварийного выброса наряду с топливными частицами и «летучими» атомами и соединениями ПД фракцию «горячих» частиц, активность которых преимущественно определялась p/н ¹⁰⁶Ru = ¹⁰⁶Rh, p/н ¹⁰³Ru и p/н ⁹⁹Mo и короткоживущими p/н, например, ¹⁰⁵Rh.

В итоге можно утверждать, что образование летучего RuO₄ из диспергированных рутениевых инклюзий началось только в выпадениях после взрывов, разрушивших реактор.

В табл. 17 приведены значения рутениевого отношения $r_{Ru} = {}^{Ru106}q_{cB} / {}^{Ru106}q_{r}$, рассчитанные по результатам посмертных измерений активности р/н 144 Се и 106 Ru в лёгких людей, оказавшихся в момент аварии в помещениях АЭС и вне их. По данным для людей в помещениях среднее значение $r_{Ru} = 2,7 \pm 2,1$ при медиане равной 2,0, а вне помещений на территории АЭС $r_{Ru} = 3,3 \pm 1,1$ при медиане 2,8. Практическое совпадение рутениевых отношений подтверждает заключение о том, что р/н состав аэрозолей в помещениях АЭС и вне их сразу после аварии был одинаковым. Общее среднее значение рутениевого отношения для обеих групп составило $r_{Ru} = 2,9 \pm 1,8$ при значении медианы $r_{Ru} = 2,5$.

При дыхании в процессе ингаляции происходит сепарация аэрозолей по размерам из-за постепенного их оседания на поверхности воздухоносных путей органов дыхания, так что до альвеол «добираются» в основном аэрозольные частицы, характеризующиеся значением аэродинамического диаметра AD 1 мкм. В аэродисперсной системе, образовавшейся сразу после взрыва, значение рутениевого отношения составляло не более $r_{Ru}=0,23$, а при ингаляции после прохождения воздухоносных путей дыхательной системы людей возросло до $r_{Ru} \approx 2,9$, т.е., относительный вклад высокодисперсной составляющей в альвеолах оказался в 10 раз больше, чем в распределении топливных частиц в воздухе.

Отсюда, в «первом приближении» можно положить, что распределения размеров рутениевых частиц характеризуются в выбросе значениями AMAD порядка нескольких мкм. Этот вывод не противоречит данным, приведённым в табл. 15, поскольку существенная часть выборки сформирована по результатам измерений на местности спустя год после аварии, когда мелкие рутениевые частицы из-за полного распада р/н ¹⁰³Ru и значительного уменьшения активности р/н ¹⁰⁶Ru стали незаметными.

Таблица 17

Результаты прижизненных измерений значений поглощённой дозы по пробам крови, посмертных измерений удельной активности р/н 144 Ce и 106 Ru в лёгких, удельной активности р/н 137 Cs в мышцах и соответствующие значения рутениевого отношения r_{Ru} .

В помещениях АЭС											Вне	помещен	ий АЭС		
No	<u>ФИО</u>	Д _г ,	τ,	^{144Ce} L,	^{106Ru} L,	Q,	r-	No	ФИО	Д _{г,}	τ,	^{144Ce} L,	^{106Ru} L,	Q,	r.
IN≌	Ψ / 10	Гр.	сут.	Бк/г	Бк/г	Бк/г	I Ru	IN≌	ΨΝΟ	Гр	сут.	Бк/г	Бк/г	Бк/г	I Ru
1	ΑΑΦ	8,9	16	22,3	15,1	2,8	2,1	1	BHB	12,1	19	1,1	1,2	0,7	4,0
2	БАИ	9,3	24	2,1	3,8	-	7,2	2	ИЕА	8,3	30	5,5	4,2	3,6	2,5
3	БВС	11,0	18	13,8	9,0	3,6	2,0	3	ИВИ	12,0	17	5,5	4,2	0,2	5,5
4	ДВМ	1,9	23	137,3	80,1	855	1,7	4	КЮИ	6,7	32	17,3	13	0,9	2,4
5	КАГ	4,7	18	73,0	38,6	2,7	1,4	5	оил	12,7	17	3,8	3,2	0,3	2,8
6	КАХ	4,7	16	488	217	729	1,1	6	ПВП	13,7	15	3,5	2,7	5,4	2,5
7	ЛВИ	5,5	21	62,3	36	1,8	1,6	7	СВИ	6,6	25	1,2	1,1	0,4	3,2
8	ПГИ	6,4	17	2,5	4,4	0,7	7,0	8	ТВИ	10,9	14	-	-	-	-
9	ПВВ	6,1	21	15,9	10,1	9,6	2,0	9	КВН	11,1	15	-	-	0,5	-
10	пкг	8,2	24	10,0	5,7	1,5	1,6	10	тни	12,5	20	_	_	0,6	_
11	ΤЛΦ	11,8	18	18,0	13,7	0,7	2,5	11	CAA	4,4	34	-	_	0,4	_

№ – порядковые номера, соответствующие табл. 7 и табл. 8;

т, сут. – время дожития после взрыва;

Д₂, Гр – персональные значения поглощённой дозы по гематологии, оценённые в больнице;

^{144Ce}L, $Б\kappa/r$ – значение удельной активности p/h ¹⁴⁴Ce из табл. 11, измеренное в лёгких, приведённое по распаду и по выведению на 26.04.1986;

^{106Ru}L, Бк/г – значение удельной активности р/н ¹⁰⁶Ru, измеренное в лёгких, приведённое по распаду на 26.04.1986;

 $Q_{(\tau)}$, Бк/г – значение удельной активности $p/h^{-137}Cs$ в пробах мышечной ткани;

 r_{Ru} – значение рутениевого отношения $r_{Ru} = {^{Ru106}q_{c6}}/{^{Ru106}q_m}$ в лёгких пострадавших, приведённое по распаду на 26.04.1986.

Суммарный парциальный вклад активности р/н ⁹⁹Mo, ¹⁰³Ru, ¹⁰⁶Ru = ¹⁰⁶Rh, рассчитанной по данным таблицы 1, в значение топливного дозового коэффициента $K = 1,1*10^{-7}$ Зв/(Бк¹⁴⁴Ce), составлял ~0,2*10⁻⁷ Зв/(Бк¹⁴⁴Ce), а парциальный вклад свободного рутения составлял 0,2*10⁻⁷·0,23 \approx 0,04*10⁻⁷ Зв/(Бк¹⁴⁴Ce), то есть вклад свободного рутения в значения дозы внутреннего облучения, обусловленного ингаляционным поступлением диспергированного топлива, составлял менее 5%.

9 Дозовый вклад «летучего» цезия

В результате взрывной разгерметизации и диспергирования ТВЭЛ часть радионуклидов цезия оказалась в составе топливных частиц (нерастворимый цезий), а другая часть – в составе «летучей» фракции (растворимый цезий).

Цезий – щелочной металл и так же, как его химические аналоги натрий и калий, примерно через сутки после ингаляционного попадания растворимой формы в организм практически равномерно распределяется по мягким тканям. В приложении к диссертации С. И. Дементьева [6] приведены результаты измерений удельной активности р/н ¹³⁷Cs

27

в пробах мочи в течение всего времени пребывания пострадавших в больнице и результаты измерений удельной активности р/н ¹³⁷Cs в посмертных пробах мышечной ткани.

По пробам мочи пострадавших (107 человек), оказавшихся в больнице, установлено медианное значение эффективного периода полувыведения растворимого цезия $T_{1/2} = 37$ суток, т.е. $\mu_{2\phi\phi} = 0.019$ сут.⁻¹.

Согласно [25], для растворимого ¹³⁷Сs для группы тканей II значение ПДД = 15 бэр/год или 0,15 Гр./год, а соответствующее значение ДСА в мышцах составляет 14 мкКи или 0,52 МБк, т.е. при хроническом содержании в мышцах 5,18·10⁵ Бк значение дозы за год 0,15 Гр./год. Отсюда, значение дозового коэффициента

$$^{\text{Cs-137}}d = \frac{0.15}{5.18 \cdot 10^5 \cdot 365.25} = 7.93 \cdot 10^{-10} \, ^{\text{\Gamma p.}}/_{\text{БK \cdot сут.}}$$

При массе мышечной ткани 2,9·10⁴ г доза от растворимого ¹³⁷Cs за время дожития составляет

^{Cs-137}Д<sub>(
$$\tau$$
)</sub> = 7,93 · 10⁻¹⁰ · 2,9 · 10⁴ · $Q_{(\tau)}$ · $e^{\mu_{3\varphi\varphi}}$ · $\int_{0}^{\tau} e^{-\mu_{3\varphi\varphi}} dt = Q_{(\tau)}$ · 1,21 · 10⁻³ ($e^{\mu_{3\varphi\varphi}}$ - 1) Гр.
Здесь τ , сут. – время дожития;

Q_(т), Бк/г – измеренное значение удельной активности р/н ¹³⁷Cs в посмертных мышечных пробах.

В среднем, в аварийных выпадениях на 26.04.1986 отношение активности р/н¹³⁷Сs к ¹³⁴Cs составляло 2,2, а отношение дозовых коэффициентов ¹³⁷Cs к ¹³⁴Cs составляет 1,7. Отсюда, значение дозы от р/н цезия:

^{Cs}Д =
$$^{Cs-137}$$
Д + $^{Cs-134}$ Д = $^{Cs-137}$ Д + $^{Cs-137}$ Д · $\frac{1}{2.2 \cdot 1.7}$ = 1,28 · $^{Cs-137}$ Д

Наибольшее значение удельной активности p/н¹³⁷Cs в пробе мышечных тканей, равное Q = 855 Бк/г (№ 4 ДВМ в табл. 7), при времени дожития т = 23 суток обусловило наибольшее среди всех погибших значение дозовой добавки от поступления «летучего» цезия:

$$\Delta \Pi = 1,28 \cdot 854 \cdot 1,21 \cdot 10^{-3} (e^{0,019 \cdot 23} - 1) = 0,72 \ \Gamma p.$$

Конечно, полученное значение дозы от внутреннего облучения растворимыми р/н цезия не маленькое, но по сравнению со значением дозы от внешнего излучения 1,9 Гр. (№ 4 ДВМ в табл. 7) и добавок к нему от внутреннего облучения, обусловленного ингаляцией топливных частиц, полученная добавка к дозе от растворимого цезия не могла оказать решающего воздействия на судьбу этого человека, и тем более «цезиевые добавки» на судьбу остальных погибших.

10 Обсуждение результатов

Значения дозы, измеренные по гематологии для восьми пострадавших из рис. 6 и для двоих из рис. 7 при «незначительных» ингаляционных поступлениях, находятся в пределах (12÷14 Гр), а время дожития для них – в пределах (14÷20 сут.). Летальный исход для этих людей обусловлен детерминированным эффектом – гибелью системы воспроизводства слизистой оболочки тонкого кишечника при значениях дозы, превышающих значение – (10÷12 Гр). Представляется маловероятным, чтобы для людей, находившихся во время взрыва и сразу после него в самых разных местах территории и помещений АЭС, значения дозы внешнего излучения и вызванные ими последствия

оказались практически одинаковыми. Возможная причина заключается в том, что одинаковые измеренные значения дозы по гематологии обусловлены «насыщением» измеряемого биологического эффекта при значениях дозы, превышающих указанное выше значение. Реальные значения дозы внешнего излучения могли быть существенно выше этого уровня при одинаковых последствиях для пострадавших.

В этой связи измеренные значения дозы по гематологии, составлявшие менее 8 Гр, можно рассматривать как соответствующие действительности. Тогда для пострадавших $\mathbb{N} \mathbb{N} \mathbb{N} \mathbb{N}$ 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, фигурирующих в табл. 7, оценки возможного вклада в дозу внутреннего облучения («дефицит» дозы), проведенные в соответствии с процедурой на рис. 7, являются минимальными, и значения действительного вклада в дозу на ЖКТ и органы дыхания, обусловленного ингаляцией топливных частиц, могли быть гораздо выше.

При средней энергии бета- излучения топливных частиц $\overline{E}_{\beta\approx}340$ кэВ (согласно табл.1), пробег бета- частиц в мягкой биологической ткани составляет около 1 мм. Таким образом, бета- излучение топливных частиц, попавших в ЖКТ, явилось существенным дополнением к дозе внешнего излучения на популяцию воспроизводящих клеток слизистой оболочки, и так называемой «дефицит» дозы у пострадавших, находившихся в помещениях ЧАЭС, был «восполнен» ингаляционным поступлением топливных частиц.

Время жизни зрелых функциональных клеток однослойного цилиндрического эпителия ~ 3 суток. Воспроизводство клеток происходит путем деления камбиальных и стволовых клеток, находящихся на дне кишечных крипт. «Новорожденные» клетки постепенно продвигаются со дна крипт до «места назначения» примерно за 2÷3 недели. Поэтому в норме в кишечной стенке одновременно существуют 5÷6 поколений функциональных клеток разного возраста. Летальный исход, обусловленный гибелью воспроизводящей системы, наступает с «износом» последнего поколения.

Что касается пострадавших №№ 2, 5, 8 и 11, фигурирующих на рис. 6, то значения времени дожития и соответствующие им значения дозы по гематологии скорее всего определяются особенностями воспроизводства. Если бы воспроизводящие клетки погибли полностью, то время жизни людей вряд ли оказалось бы более двух недель. По-видимому, не у всех из пострадавших воспроизводящие клетки погибли полностью, но жизнеспособность оставшихся фрагментов популяции этих клеток оказалась ниже критического значения, достаточного для своевременного воспроизводства.

Интервал значений времени дожития, в интервале значений дозы (4,4÷14) Зв составил от 34 сут. до 14 сут. и, по-видимому, был обусловлен различием у разных людей количества оставшихся жизнеспособных фрагментов воспроизводящей системы однослойного цилиндрического эпителия [15].

Что касается трех человек, проживших после аварии по 3 месяца, то у них оценки значений дозы на Т составили:

ВЮА	86 сут	Д+Δ _Т =13 Гр;
HAB	91 сут	Д+ Δ _Т =13 Гр;
ЛКИ	96 сут	$\Pi + \Delta_{\mathrm{T}} = 6 \Gamma \mathrm{p};$

В силу каких-то индивидуальных обстоятельств им удалось пережить критическую точку регенерации воспроизводящей системы однослойного цилиндрического эпителия, но через 3 месяца их, по-видимому, настиг костномозговой синдром.

В рамках принятой в настоящее время концепции [4, 26] считается, что внутреннее облучение людей, обусловленное ингаляционным поступлением активности сразу после взрыва реактора, не могло оказать существенного воздействия на судьбу людей, погибших от ОЛБ в течение первого месяца после аварии.

Вообще говоря, основными факторами, определяющими значения дозы на органы и ткани людей, подвергшихся ингаляционным поступлениям р/н [27], являются:

р/н состав поступления;

значения активности поступивших р/н;

физико-химические характеристики поступления, – в газообразном состоянии, в составе аэрозольных частиц;

растворимость аэрозолей в жидкостях организма;

распределение размеров аэрозольных частиц (дисперсность), характеризуемое значением AMAD.

Проведенный анализ показал, что все основные факторы, кроме дисперсности, в традиционной концепции и в настоящей работе практически совпадают.

Надо сказать, что универсальный способ описания логнормальным законом распределения размеров частиц аэродисперсных проб является достаточно серьезной идеализацией. Тем не менее, ничего получше пока нет.

В обосновании традиционной концепции на основе чисто умозрительных соображений было принято значение AMAD=15 мкм [4].

В то же время результаты прямых измерений спектра дисперсности топливных частиц в тонкослойных пробах выпадений, приведенные на рис. 4, показывают, что на расстоянии от 8 км до 30 км по следу выпадений первичного выброса значения AMAD равномерно уменьшаются от 95 мкм до 50 мкм.

Следует отметить, что эти измерения – единственные прямые измерения распределений дисперсности топливных частиц в выпадениях первичного аварийного выброса поблизости от Чернобыльской АЭС.

Конечно, соотношения распределений размеров аэрозольных частиц в выпадениях и в воздухе – субстанция достаточно неопределённая, но во всяком случае представляется маловероятным, чтобы распределения размеров топливных частиц сразу после взрыва на территории и в помещениях АЭС можно было бы для всех пострадавших характеризовать одинаковым значением АМАD.

В этой связи оценки индивидуальных значений AMAD по данным «человеческих» измерений, приведенные в табл. 11, не противоречат исследованиям пяти тонкослойных проб БАВ, отобранных по следу первичных выпадений, результаты которых приведены в табл. 5 и на рис. 4. Во всяком случае, все они существенно превышают принятое в традиционной концепции значение AMAD=15 мкм.

Клинические проявления необратимого воздействия ингалированных топливных частиц на ЖКТ погибших могли быть установлены после анатомических исследований. В то же время, прежде чем проследовать в ЖКТ, ингалированные топливные частицы сразу после поступления в зависимости от значений AD распределяются на поверхности различных отделов органов дыхания. Согласно оценкам, приведенным в табл. 11, соответствующие значения накопленной дозы столь велики, что должны были привести к тяжелым орофарингиальным проявлениям и к видимым «невооруженным глазом» поражениям области Г, примыкающих к ней ротовой полости, носовых ходов и т.д.

Более ста человек из находившихся в ночь на 26.04.1986 г. в помещениях и на территории ЧАЭС были вывезены и примерно через двое суток госпитализированы в специальной клинике в Москве. Таким образом, систематические наблюдения и интенсивная терапия начались примерно через двое суток после аварии. Двадцать пять человек из них умерли в клинике в течение весны и лета 1986 года.

В настоящее время считается, что основным дозобразующим фактором было внешнее гамма- и бета- облучение в ночь аварии. Однако, ретроспективные оценки значений дозы внешнего облучения по данным гематологических измерений в ряде случаев не соответствуют тяжести последствий и не могут быть объяснением смерти в условиях клиники.

Обобщенные клинические данные по 107 пациентам приведены в книге [26].

На третьи ÷ четвертые сутки после аварии у 80 пациентов появились признаки орофарингиального синдрома. К десятым суткам начальные проявления развились до радиационных мукозитов различной тяжести вплоть до III – IV степени.

Цитирую выдержки из [26] (стр. 42 ÷ 45):

Обращает на себя внимание несколько большая частота мукозита по сравнению с пациентами из других аварий...

Кишечный синдром (КС) был одним из наиболее тяжелых и грозных проявлений ОЛБ. Развитие его на 4-8 сутки отмечено у 10 больных после кратковременного облучения в дозах, приближающихся к 10 Гр...

Проявления КС сочетались одновременно с язвенным стоматитом с выделением большого количества слизи, содержавшей иногда наличие крови. Эти нарушения затрудняли не только прием пищи, но и дыхание пациентов, поскольку они затрагивали вход в гортань...

Острый лучевой пульмонит, ранее наблюдавшийся при гамма- терапевтическом облучении больных лейкозом, имел место у семи пациентов с ОЛБ IV степени тяжести... Заболевание завершилось развитием гипоксемической комы на 14-30 день после облучения. Как правило, эти проявления сочетались с признаками лучевого поражения кожи и кишечника...

В тот ранний период определяющим в патогенезе было признано действие излучений. При последующем размышлении возникло предположение о возможном недоучете химических токсичных факторов (продукты горения пластика и других конструкционных материалов, газо- и аэрозолеобразные выбросы топлива и забрасываемые в реактор материалы с целью приостановления горения и ограничения выбросов) ...

Дозиметрические исследования содержания в организме цезия и йода проводились как непосредственно в палатах, так и при расширении режима в лаборатории на счетчиках излучения тела человека... Эти квалифицированные измерения подтвердили крайнюю редкость существенной инкорпорации ракдионуклидов и преобладающую значимость внешнего излучения в развитии изменений в состоянии здоровья пострадавших [26] (стр. 47 ÷ 48).

«Не от хорошей жизни» авторам пришлось к причинам летальных последствий «подключить» продукты горения пластика, тем более, что ночью после взрыва ни о каких «забрасываемых в реактор материалов» и речи быть не могло, а «газо- и аэрозолеобразные выбросы топлива» прежде всего являются причиной инкорпорирования активности путем ингаляции и должны были привести к внутреннему облучению прежде всего верхних дыхательных путей и кишечника. Таким образом существует противоречие между принятыми дозовыми оценками и их клиническими проявлениями, особенно для части пострадавших, оказавшихся в момент аварии в помещениях ЧАЭС.

Все становится на свои места, если принять во внимание, что при проведении анализа обстоятельств произошедшего не провели оценку дозы на ЖКТ, обусловленной в первые сутки после поступления транзитом ингалированной грубодисперсной аэрозольной компоненты диспергированного топлива из верхних дыхательных путей через ЖКТ.

На первый взгляд представляется парадоксальным, что ингаляционное поступление могло обусловить летальную дозу на тонкий кишечник, но давайте вспомним, что это были нерастворимые аэрозоли, образовавшиеся при взрыве активной зоны, содержавшей отработанное реакторное топливо и «протянутые» из разрушенного реактора

«сквозняком» и штатной вентиляцией через рабочие помещения, в которых находилась ночная смена работников ЧАЭС.

Обычно оценку значений дозы на верхние отделы органов дыхания и на ЖКТ проводят по результатам измерения активности нерастворимых аэрозолей, прошедших в первые сутки после депонирования транзитом через ЖКТ в фекалии, пробы которых отбирают в течение первых нескольких суток после поступления.

Складывается впечатление, что при госпитализации пострадавших отбор на измерения проб фекалий в течение первых нескольких суток вообще не проводили, а «квалифицированные измерения на спектрометре излучений человека (СИЧ)» были проведены гораздо позже того, как закончилась транзиторная очистка верхних дыхательных путей через ЖКТ, т.е. когда «поезд уже ушел». Таким образом один из существенных факторов дозообразования «ушел» незамеченным, но оставил после себя тяжелые последствия.

11 Выводы

1. На основе анализа результатов собственных исследований аварийных выпадений и результатов клинических наблюдений, проведенных в шестой больнице, установлено наличие дозового вклада от транзита топливных частиц, и сделана его оценка для тех, кто оказался в момент аварии в помещениях ЧАЭС и позже погиб. Показано, что причиной смерти была кишечная форма острой лучевой болезни, обусловленная сочетанным воздействием внешнего фотонного излучения внутреннего И бета-излучения однослойного ингалированных радионуклидов на систему воспроизводства цилиндрического эпителия тонкого кишечника при транзите ингалированных топливных частиц через ЖКТ.

2. Анализ совокупности сложившихся обстоятельств позволяет рассматривать причиной «чернобыльского кашля», распространявшегося летом 1986 г. и летом 1987 г. на территориях, подвергшихся интенсивным выпадениям ЧАЭС, ингаляцию р/н ¹⁰³Ru и ¹⁰⁶Ru в составе летучих молекул RuO₄, образовавшихся в выпадениях рутениевых «горячих» аэрозольных частиц.

3. При своевременном обнаружении транзита активности в ЖКТ дозу облучения ЖКТ, а также отделов Н и Г органов дыхания можно уменьшить путем срочного промывания. Соответственно, на предприятиях, где существует потенциальная опасность аварийного поступления р/а аэрозолей, должны быть предусмотрены средства измерений для оперативного обнаружения поступления р/а в организм человека и регламент, обеспечивающий в случае необходимости своевременное принятие решения о срочном проведении защитных мероприятий.

Что касается анализа последствий аварии на ЧАЭС, то представляется целесообразным продолжить работу путем сопоставления полученных оценок с клиническими проявлениями, выявленными и зарегистрированными весной и летом 1986 года у людей, госпитализированных сразу после аварии

12 Послесловие

Для меня эта работа началась в конце июля 1986 г., когда я был командирован в Чернобыль, и продолжается по сей день с перерывом от 1997 по 2016 гг. Эту работу мне никто не заказывал. Побудительный мотив – выявить причину всеобщего кашля в зоне аварийных выпадений ЧАЭС летом 1986 г. и летом 1987 г. Работа опирается на результаты, полученные как по моей просьбе, так и при моем участии.

С. Ю. Антропов обработал на ЭВМ результаты применения фоторадиометрической методики к измерениям проб БАВ в 1989 г.

В. Н. Даниленко измерил на ППД гамма- спектрометре пробы БАВ в 1988 г.

С. И. Дементьев измерил на ППД гамма- спектрометре посмертные пробы тканей людей, умерших весной и летом 1986 г., и пробы мочи и крови у всех госпитализированных сразу после аварии.

А. А. Молоканов провел дозиметрические расчеты в рамках дыхательных моделей МКРЗ в 2016 ÷ 2017 гг.

С. В. Петров участвовал в полевых измерениях и обработке их результатов летом и осенью 1986 г.

Особая благодарность академику Л. А. Ильину за интерес к работе и за высказанные им важные замечания принципиального характера, которые были учтены.

Я благодарен Ю.А Кузьминой С.В. Татаркину за их помощь в оформлении текста и В.В. Кухтину за создание англоязычной версии статьи в 2018 г.

Время идет, а люди уходят... Ушли А.К. Гуськова и И.Б. Кеирим-Маркус, я благодарен им за поддержку и интерес. Они по-прежнему со мной.

Список литературы

1. *А. П. Ермилов* Феномен топливных частиц в последствиях аварии на ЧАЭС. АНРИ №1(84), 2016. С. 15-33.

2. *А. П. Ермилов* Феномен топливных частиц в последствиях аварии на ЧАЭС. Часть 2. АНРИ №3(85), 2016. С. 22-30.

3. *А. П. Ермилов, А. А. Молоканов* Феномен топливных частиц в последствиях аварии на ЧАЭС. Часть 3. АНРИ №1 (88) 2017. С. 62-65.

4. *В. Н. Кутьков* Радионуклидное загрязнение воздушной среды в результате аварии на Чернобыльской АЭС и облучение легких. Раздел 1 в монографии А.Г. Чучалин, А.Л. Черняев, К. Вуазен. Патология органов дыхания у ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС. ГРАНТЪ М., 1998, ISBN 5-89135-051-3. С. 10-43

5. *А.П. Ермилов, А.М. Зиборов* Радионуклидные характеристики топливной компоненты чернобыльских радиоактивных выпадений «Радиация и риск» 1997, вып. 9. С. 95-106.

6. *С.И. Дементьев.* Приложение к диссертации на соискание учетной степени кандидата биологических наук «Кинетика обмена радиоактивных продуктов у людей, пострадавших при аварии на Чернобыльской АЭС (03.00.01-Радиобиология), М., 1990 г.

7. *А.П. Ермилов, А.М. Зиборов* Радионуклидные соотношения в топливной компоненте радиоактивных выпадений в ближней зоне ЧАЭС «Радиация и риск» 1993, вып.3. С. 134-138.

8. А.П. Ермилов, А.М. Зиборов Оценка топливной и конденсационной составляющих «нелетучих» радионуклидов в выпадениях на дальних расстояниях от Чернобыльской АЭС «Радиация и риск» 1997, вып. 9. С. 90-94.

9. А.П. Ермилов, А.М. Зиборов Физическое обоснование универсальной модели радиоактивных выпадений в результате аварии на Чернобыльской АЭС «Радиация и риск» 1997, вып. 10. С. 151-159.

10. *А.П. Ермилов, В.П. Ярына* Радиометрическая оценка плотности выпадений альфа-излучающих нуклидов на почву «Измерительная техника 1989 т. III». С. 57.

11. В.А. Виноградов, А.П. Ермилов, С.В. Петров, О.Д. Прохоренко, Д.Д. Тихомиров, В.П. Ярына Использование седиментационной методики определения плотности выпадения трансурановых элементов в районе Чернобыльской АЭС «Измерительная техника 1989 т. III». С 57-58.

12. ICRP: Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public. URL:http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP CD1.

13. *А.Н. Власенко, В.И. Легеза, С.Ю. Матвеев, А.Е. Сосюкин под ред. проф. А.Е. Сосюкина* Клиническая радиология. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008 г.

14. Основные анатомические и физиологические данные для использования в радиационной безопасности. Публикация МКРЗ 89. Под ред. проф. И. Б. Кеирим-Маркуса. Москва. Медкнига. 2007.

15. Гистология. А. Хэм, Д. Кормак. Москва. «Мир». 1983.

16. Нормы МАГАТЭ по безопасности. Критерии для использования при обеспечении готовности и реагирования в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации. Общее руководство по безопасности № GSG-2.

17. Химическая энциклопедия. Научное издательство «Большая Российская Энциклопедия». Москва. 1998.

18. Interim report of fallout situation in Finland from 5 to 16 May 1986. Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety. Helsinki. 1986. Stuk-B-valo 45.

19. *Ю. А. Израэль, В.Н. Петров, С.И Авдюшин, П.К. Гасилина, Ф.Я. Ровинский, В.А. Ветров, С.М. Вакуловский* Радиоактивное загрязнение природных сред в зоне аварии на ЧАЭС. Метеорология и гидрология. 1987. № 2. С. 11.

20. *Rolf Falk, Iorma Suomela, Andor Kerekes* A study of "Hot particles" collected in Sweden one year after the Chernobyl accident. Proceedings of the 1988 European aerosol conference 30 August – 2 September 1988. Pergamon Press. P. 1339-1342.

21. *L. Devell, H. Tovedal, U. Bergstrom, A. Appelgren, J. Chissler, L. Andersson* Initial observations of fallout from the reactor accident at Chernobyl. Nature. Vol. 324 15 May 1986. P. 192-193.

22. *С. А. Богатов, А. А. Боровой.* О некоторых свойствах топливосодержащих частиц, образовавшихся при аварии на ЧАЭС и особенностях формирования топливного выброса. ИАЭ-5344/3. Москва 1991.

23. С. Н. Бегичев, А. А. Боровой, Е.В. Бурлаков, С.Л. Гаврилов, А.А. Довбенко, А.А. Левина, В.М. Маркушев, А.Е. Марченко, А.А. Строганов, А.Л. Татауров Топливо реактора 4-го блока ЧАЭС (краткий справочник). ИАЭ-5268/3. Москва-1990.

24. *В. М. Горбачёв, Ю.С. Замятнин, А.А. Лбов* Взаимодействие излучений с ядрами тяжёлых элементов и деление ядер. Справочник. М., Атомиздат, 1976

25. Нормы радиационной безопасности НРБ-76/87 и Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП-72/87/Минздрав СССР. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

26. А.К. Гуськова, И.А. Галстян, И.А. Гусев Авария Чернобыльской атомной станции (1986÷2011 гг.): последствия для здоровья, размышления врача. М.:2011 ISBN: 978-5-9903385-1-7.

27. Radiation protection ICRP PUBLICATION 66. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. A report of a Task Group of the ICRP. Adopted by the Commission in september 1993. Published for ICRP. Pergamon

