

УДК 614.876(477):519.24

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛУЧЕВЫХ НАГРУЗОК НА УЧАСТНИКОВ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС ПО ДАННЫМ РГМДР

*Питкевич В.А., Иванов В.К., Цыб А.Ф., Максюттов М.А.,
Матяш В.А., Щукина Н.В. (МРНЦ РАМН)*

В настоящее время Российский государственный медико-дозиметрический регистр (РГМДР) содержит данные о состоянии здоровья 159 071 участника ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Для 125 771 чел. на основании справок, выданных в зоне проведения работ, в РГМДР занесены данные о дозе внешнего облучения. К сожалению, в настоящее время нет возможности установить, какая это доза — поглощенная или экспозиционная. Максимальное отличие экспозиционной дозы от поглощенной может достигать 30%, т.е. поглощенная доза может составлять 0,7 экспозиционной (оценка получена по результатам измерения ГНЦ РФ — Институт биофизики в 30-км зоне Чернобыльской АЭС). В дальнейшем анализе, полагая, что погрешность индивидуальной дозы может быть значительно больше 30%, возможное отличие типа дозы не учитывается и используется единица поглощенной дозы сГр.

Для более ясного понимания характера дозиметрической информации, занесенной в РГМДР, полезно описать, когда и как был организован дозиметрический контроль лучевых нагрузок в зоне ликвидации последствий аварии. После аварии на Чернобыльской АЭС индивидуальный дозиметрический контроль был поручен министерствам обороны, среднего машиностроения и энергетики. Самостоятельно дозиметрический контроль осуществлялся также МВД, КГБ СССР (до сентября 1987 г.) и АН СССР. На индивидуальном дозиметрическом контроле с 1986 г. состояли работники более 600 организаций 49 министерств и ведомств СССР. Наибольшая численность работников при этом приходилась на подразделения Минэнерго СССР.

С октября 1986 г. дозиметрические данные стали заноситься в ЭВМ. В апреле 1988 г. на базе Управления дозиметрического контроля НПО «Припять» была сформирована автоматизированная информационно-справочная система индивидуального контроля, которая содержала информацию о 103 800 участниках ликвидации последствий аварии. С 1987 г. оценку лучевых нагрузок на персонал Чернобыльской АЭС осуществляла ее служба контроля радиационной безопасности. Контроль персонала, занятого на работах в зоне отчуждения, проводился Управлением дозиметрического контроля НПО «Припять».

До аварии облучение персонала АЭС контролировалось конденсаторными дозиметрами типа КИД и индивидуальными пленочными фотодозиметрами (ИФКУ), разработанными в Институте биофизики, с диапазоном измеряемой экспозиционной дозы от 50 мР до 2 Р. В ночную смену 26 апреля 1986 г. на АЭС работали около 400 чел., которые имели только ИФКУ [1]. Таким образом, персонал в момент аварии не был оснащен необходимыми аварийными средствами индивидуального контроля. Также не имели аварийных средств контроля и пожарные, прибывшие на место аварии. В то же время мощность экспозиционной дозы на кровле и в рабочих помещениях после взрыва при тушении пожара достигала несколько сот Р/ч.

Приборное и методическое обеспечение дозиметрических служб различных министерств и ведомств, проводивших индивидуальный дозиметрический контроль, было различным. Таким образом, и точность измерения индивидуальной дозы будет также разной. В работах по ликвидации последствий аварии можно выделить три основных контингента наиболее облученных лиц [1]: персонал АЭС, служба радиационной безопасности которой приложила много усилий для организации индивидуального дозиметрического контроля, работники, командированные в 30-км зону для ликвидации последствий аварии, и личный состав формирований МО СССР.

Радиационная обстановка в местах проведения работ по ликвидации последствий аварии была существенно различной [2]. В первые месяцы после аварии мощность экспозиционной дозы в зоне проведения работ определялась наличием короткоживущих радионуклидов и быстро уменьшалась с течением времени. Наиболее сложной и опасной была радиационная обстановка в 30-км зоне Чернобыльской АЭС. Некоторое представление об этом дают данные табл. 1. Как следует из табл. 1, ее загрязненность, а следовательно, и радиационная обстановка существенно зависели от расстояния до аварийного энергоблока. Радиационная обстановка существенно усложнялась также большой неоднородностью радиоактивных выпадений (табл. 2).

Т а б л и ц а 1. Загрязненность 30-км зоны Чернобыльской АЭС некоторыми долгоживущими радионуклидами (данные Управления дозиметрического контроля НПО «Припять»)

Параметры зоны		^{137}Cs		^{90}Sr		$^{239,240}\text{Pu}$	
$r_1 - r_2$, км	Площадь, км ²	A	σ	A	σ	A	σ
0—1	2	3100	1550	300	150	7	3,5
1—3	25	13200	528	14000	560	30	1,2
3—5	50	22600	452	3000	60	63	1,3
5—15	628	47100	75	63000	100	260	0,4
15—30	2120	24000	11	17000	8	440	0,2
0—30	2825	110000	52	100000	35	800	0,3

Примечания. $r_{1,2}$ — внутренний и внешний радиус кольца вокруг аварийного энергоблока; A — суммарная активность радионуклида в выпадениях, Ки; σ — средняя удельная плотность выпадений, Ки/км².

Т а б л и ц а 2. Плотность выпадений (минимальная—максимальная) некоторых радионуклидов в 30-км зоне (данные Управления дозиметрического контроля НПО «Припять» на 1993 г.), Ки/км²

Территория	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{239,240}\text{Pu}$	^{241}Am
Припять	0,7—89	1,2—33	0,04—1,4	0,03—1,05
Чернобыль	7—22	3,5—15	0,02—0,04	0,015—0,03
5-км зона	2,7—450	1,8—440	0,31—4,71	0,23—3,55
5—80-км зона	0,03—58	0,1—53	0,12—0,2	0,09—0,15

Таким образом, участники ликвидации последствий аварии при выполнении работ вне и внутри 30-км зоны находились (особенно в 1986—1987 гг.) в чрезвычайно неоднородном радиационном поле β - и γ -излучения, поэтому с приемлемой точностью дозу облучения можно было оценить только с помощью индивидуального дозиметрического контроля, который фактически отсутствовал в первые несколько недель после аварии.

По степени надежности дозиметрические данные участников ликвидации последствий аварии можно разделить на три основные группы в зависимости от метода оценки дозы:

экспозиционная или поглощенная доза, измеренная с использованием индивидуального дозиметра, — максимальная погрешность около 50% при условии его правильного применения;

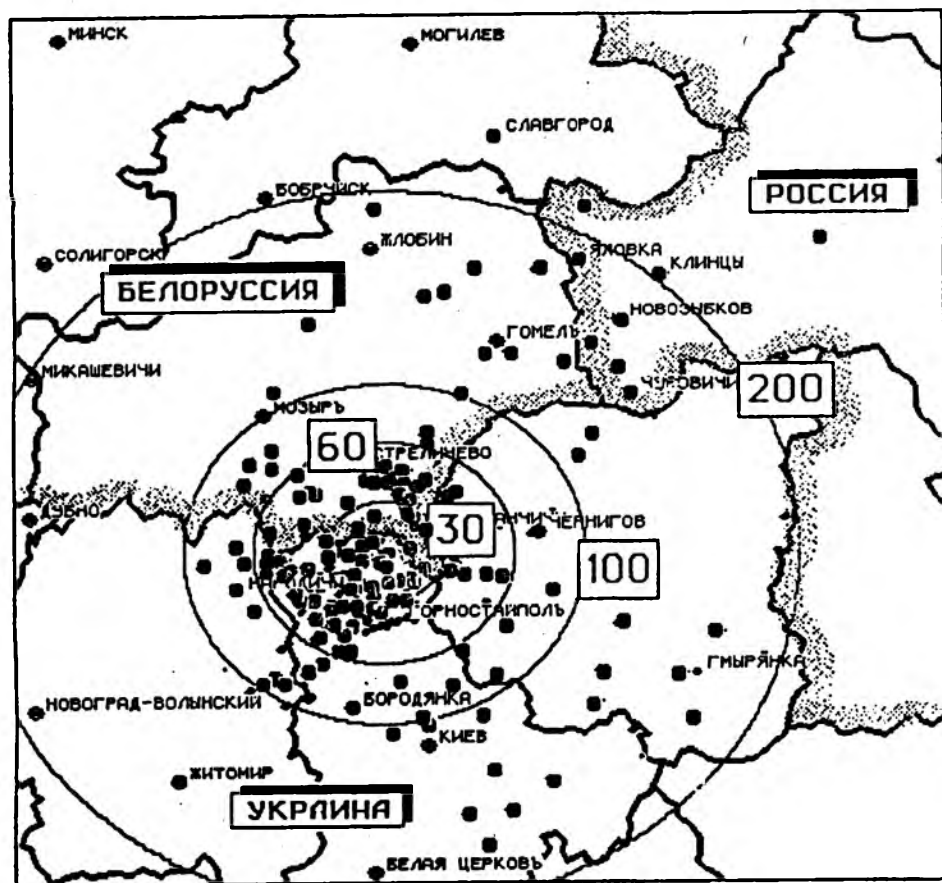
групповая доза, приписанная лицам, входившим в группу, которая выполняла какую-либо работу в зоне, по показаниям индивидуального дозиметра, находившегося у одного из членов группы, — максимальная неопределенность дозы по группе могла достигать 300%;

маршрутная доза, которая оценивалась по средней мощности экспозиционной дозы в зоне проведения работ и времени пребывания в ней группы лиц, — максимальная неопределенность дозы по группе могла достигать 500%.

Следовательно, в настоящее время качество дозиметрических данных для значительного числа участников ликвидации последствий аварии может быть невысоким при отсутствии в РГМДР дополнительных данных о характере, месте и времени проведения работ. Все это обосновывает актуальность верификации дозиметрических данных. В качестве первого этапа верификации в настоящей статье приведены результаты детального статистического анализа этих данных.

Распределение поглощенной дозы участников ликвидации последствий аварии. Всего в РГМДР имеются данные о лучевых нагрузках 126 771 чел. (79,1% общего числа на конец 1994 г.). Для анализа была проведена работа по нахождению географических координат населенных пунктов, где проживали или работали участники ликвидации последствий аварии. Такую информацию с данными дозиметрии удалось найти для 119 782 чел. Для дальнейшего анализа были выбраны записи базы данных РГМДР, в которых доза внешнего облучения не превышала 50 сГр. У 366 чел. доза больше 50 сГр, и поэтому эти данные не включены в анализ до документального их подтверждения. Таким образом, для анализа было выбрано 119 416 записей.

Анализируя данные рис. 1, следует отметить, что участниками ликвидации последствий аварии считаются лица, имеющие официальные удостоверения. Из-за большого радиоактивного загрязнения на некоторых территориях вне 30-км зоны Чернобыльской АЭС проводились дезактивационные работы. Их участники получали затем



Р и с. 1. Распределение населенных пунктов проживания или работы участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС (указано расстояние от АЭС в км)

соответствующие официальные удостоверения. Этим объясняется широкий разброс расстояния от населенных пунктов, где проживали или работали участники ликвидации последствий аварии, до Чернобыльской АЭС — до 250 км. В 1986—1989 гг. лишь около 30—40% проживали или работали в 30-км зоне Чернобыльской АЭС, что является существенным при анализе дозовых нагрузок.

Рассмотрим плотность $f(D)$ распределения поглощенной дозы. Далее будем представлять ступенчатую аппроксимацию $f(D)$, равную для дозового интервала $(D, D + \Delta D)$ $f(D) = \Delta N / \Delta D / N$, где ΔN — число участников ликвидации последствий аварии с зарегистрированной дозой в интервале $(D, D + \Delta D)$; N — общее число человек в анализируемой группе.

Сформируем группы участников ликвидации последствий аварии в зависимости от даты первого въезда в зону радиоактивного загрязнения: 1986, 1987, 1988, 1989 и 1990 гг. Это разделение естественно в соответствии с характером выполняемых работ (с 20 мая по 31 октября 1986 г. — строительство объекта «Укрытис») и существенно разной радиационной обстановкой. Некоторые данные о частотном распределении лучевых нагрузок даны в работе [3]. Более подробно функция $f(D)$ для указанных выше дат въезда в зоны ликвидации последствий аварии приведена в работе [4].

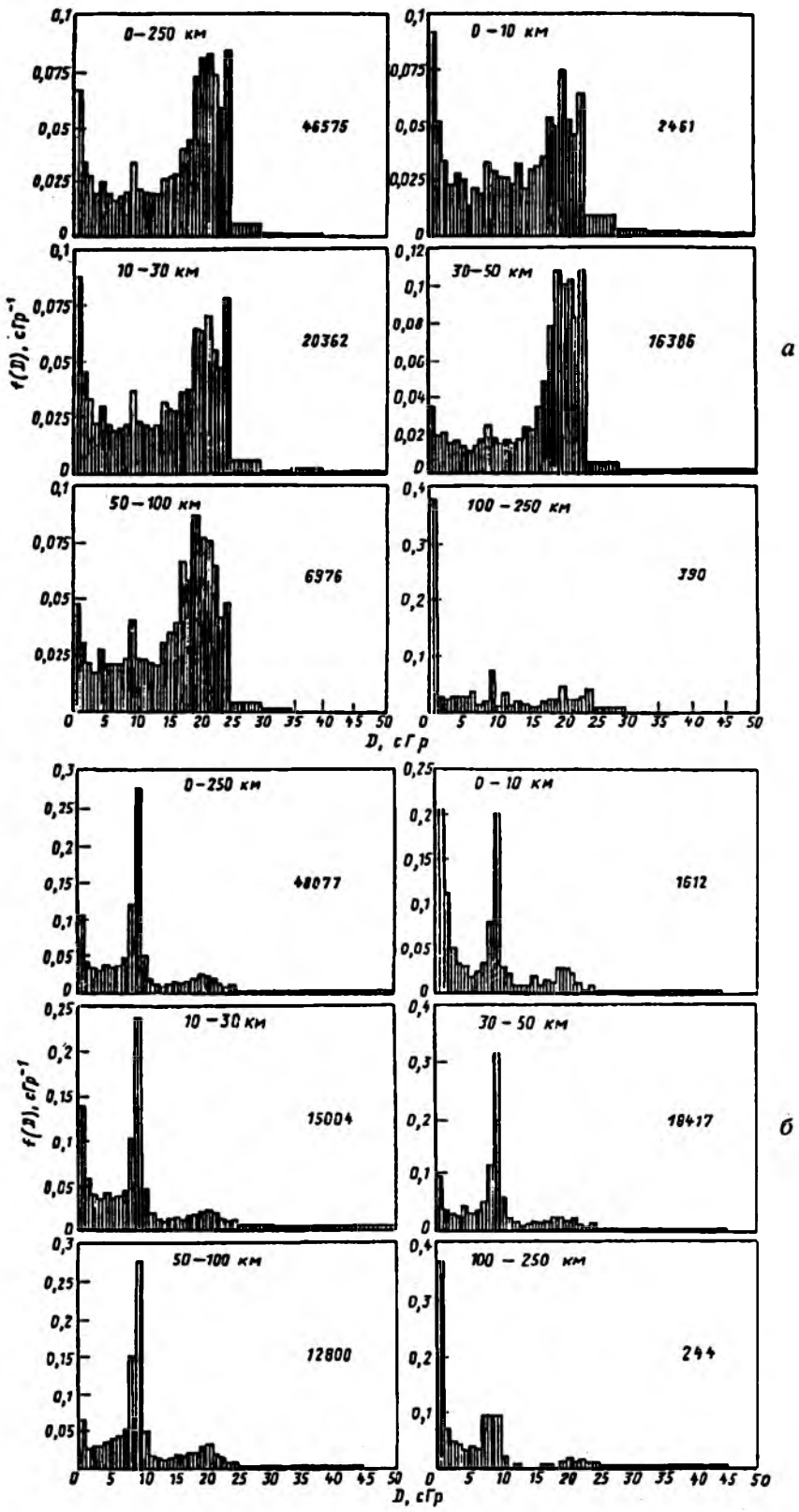
Рассмотрим дозовое распределение в 1986 г., так как именно в этом году участники ликвидации последствий аварии подверглись наиболее интенсивному облучению. Как видно из рис. 2, а, распределение дозы на расстоянии до 30 км (наибольшее число участников ликвидации последствий аварии проживало или работало вблизи Чернобыля) похоже на общее распределение. На расстоянии 30—50 км основная доля участников ликвидации последствий аварии получила дозу 20—25 сГр; 50—100 км — 15—25 сГр. В дальней зоне (100—250 км) распределение дозы резко повышется около 1 сГр и далее почти равномерное — до 25 сГр. Как можно видеть из рис. 2, б, на расстоянии до 100 км в распределении имеются максимумы при дозе ~ 1,1 и 20 сГр. В 1988 г. наблюдается максимум ~ 1 сГр, добавляется максимум ~ 5 сГр и исчезает максимум ~ 20 сГр.

Таким образом, принятое разделение участников ликвидации последствий аварии по дате прибытия в зону радиоактивного загрязнения и расстоянию населенного пункта проживания или работы до Чернобыльской АЭС действительно свидетельствует о принципиальном различии характера распределения дозовых нагрузок. Следует также отметить, что распределение дозы по всем годам до 1990 г. заканчивается ~ 50 сГр. Это обстоятельство может свидетельствовать в пользу определенной достоверности дозы для участников ликвидации последствий аварии, занесенной в РГМДР, так как 50 сГр значительно больше дозового предела 25 сГр, установленного для 1986 г. Если бы дозиметрические службы зоны выдавали справки о полученной дозе, руководствуясь лишь принципом обязательного непревышения дозовых пределов: 25 сГр — 1986 г., 40 сГр — 1987 г., 5 сГр — последующие годы, то в РГМДР не было бы больших значений дозы.

На данном этапе верификации данных можно считать, что явных противоречий между радиационной обстановкой в зоне радиоактивного загрязнения, характером работ, проведенных участниками ликвидации последствий аварии, и занесенной в РГМДР дозой нет.

Рассмотрим дозовое распределение в 30-км зоне до и после начала строительства объекта «Укрытис». После ликвидации пожара на аварийном энергоблоке и предотвращения горения графита в шахте разрушенного реактора в середине мая было принято решение о его долговременной консервации, т.е. о строительстве объекта «Укрытис».

Радиационная обстановка вблизи разрушенного энергоблока была тяжелой. В конце мая — начале июня 1986 г. основным фактором, определяющим радиационную обстановку при сооружении «Укрытия», было γ -излучение, мощность экспозиционной дозы которого изменялась в разных точках от 100 мР/ч до 100 Р/ч. В радиационном поле с мощностью экспозиционной дозы 0,1 Р/ч дозовый предел 25 сГр мог быть до-



Р и с. 2. Плотность $f(D)$ функции распределения дозы D для участников ликвидации последствий аварии, прибывших на загрязненную территорию в 1986 г. (а) и 1987 г. (б), в зависимости от расстояния пункта их проживания (работы) до АЭС

стигнут примерно за 50 сут при 5-часовом рабочем дне, 100 Р/ч — за 15 мин. Оценки максимально допустимого времени выполнения работ возле разрушенного энергоблока указывают на возможную длительность пребывания в 30-км зоне от 1—2 до примерно 100 сут при достаточно надежном индивидуальном дозиметрическом контроле.

Если анализировать плотность $f(T)$ распределения длительности T пребывания участников ликвидации последствий аварии на загрязненной территории (по данным РГМДР) для разной даты прибытия в зону проведения работ, то можно заметить резкий максимум при $T \approx 1$ сут, хотя численность участников ликвидации последствий аварии с таким малым временем пребывания невелика: 1—4% в разные годы. Так, в 1986 г. 569 чел. из 46 575 пребывали в зоне не больше 3 сут. При этом средняя доза внешнего облучения для группы, находившейся в Припяти (116 чел.) или Чернобыле (355 чел.), составила 10,1 сГр со среднеквадратичным отклонением 10,2 сГр.

При большей длительности пребывания для 1986 г. $f(T)$ медленно растет, образуя максимум ~ 50 сут, затем резко снижается к 100 сут, что согласуется с приведенными оценками допустимого времени пребывания, исходя из дозового предела 25 сГр. В 1987—1989 гг. $f(T)$ имеет более острый максимум при $T \approx 60$ —70 сут и почти равномерна при $T > 3$ сут в 1990 г.

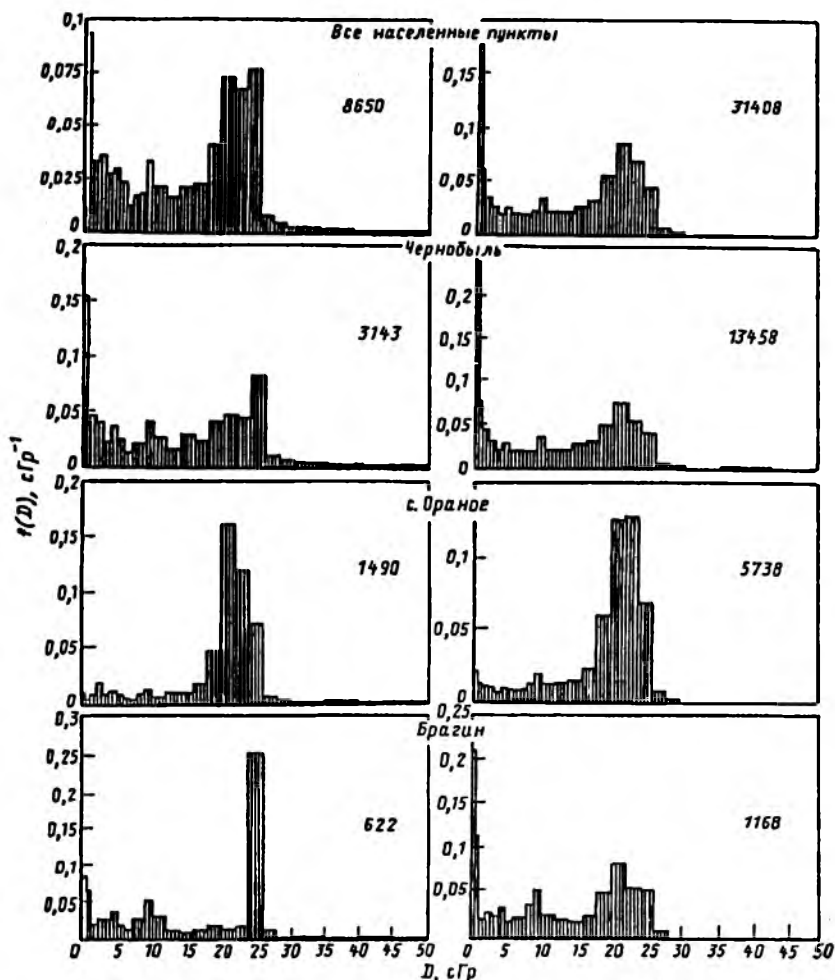
Таким образом, и на данном этапе верификации данных не удастся обнаружить существенных противоречий в дозиметрических данных РГМДР.

Как уже указывалось, география проведения работ в зоне радиоактивного загрязнения обширная. Наибольшее число участников ликвидации последствий аварии зафиксировано в Брагине (Могилевская область), Иванкове (Киевская область), Новой Радче, Ораносе (Киевская область), Припяти и Чернобыле. Сравним дозовое распределение до и во время строительства объекта «Укрытие» в разных населенных пунктах.

На рис. 3 показана плотность распределения дозы, полученной участниками ликвидации последствий аварии, пребывавшими в зоне радиоактивного загрязнения с момента аварии 26 апреля и до 20 мая 1986 г. — начала строительства «Укрытия» (слева) и с 21 мая до 31 октября 1986 г. — приемки «Укрытия» (справа). Сравнение показывает, что до налаживания индивидуального дозиметрического контроля дозовое распределение имеет хаотический характер с резким обрывом при 25 сГр. В более поздний период (строительство объекта «Укрытие»), когда дозиметрический контроль приобрел, по-видимому, более высокое качество, дозовое распределение становится более плавным с двумя максимумами ~ 1 и 20 сГр. Для Чернобыля можно сделать комментарий, аналогичные уже сделанным для всей зоны. В Ораносе, где в основном проживали или работали военнослужащие, характер распределения сильно отличается от распределения дозы для Чернобыля — до и после начала строительства «Укрытия» дозовое распределение имеет достаточно узкий максимум в области 20—25 сГр. Еще более контрастно по сравнению с Чернобылем выглядит дозовое распределение для Брагина, где также в основном проживали военнослужащие. По-видимому, в последних двух случаях доза для участников ликвидации последствий аварии оценивалась по времени работы и мощности экспозиционной дозы в зоне проведения работ.

Таким образом, анализ плотности распределения дозы участников ликвидации последствий аварии с разной датой прибытия в зону радиоактивного загрязнения и длительностью пребывания позволяет выделить группы с существенно разным распределением дозы. Выделение таких групп является важным при эпидемиологическом анализе их состояния здоровья. Кроме того, можно видеть, что доля наименее точной дозы (маршрутной) незначительна (г. Брагин и с. Оранос).

Как уже указывалось, разные ведомства самостоятельно проводили оценки и контроль лучевых нагрузок на участников ликвидации последствий аварии, используя при этом собственные методики. Поэтому интересно сравнить распределение дозы, занесенной в РГМДР и подрегистры Министерства обороны и ГНЦ РФ — Институт биофизики.



Р и с. 3. Распределение поглощенной дозы участников ликвидации последствий аварии с различной датой прибытия в зону радиоактивного загрязнения

На конец 1994 г. из ведомственного подрегистра Министерства обороны РФ в РГМДР переданы данные о лучевых нагрузках 17 645 участников ликвидации последствий аварии (в основном кадровый состав) из общего числа зарегистрированных 20 392 лиц. Из данных по региональным центрам РГМДР также выделена группа лиц, возраст которых на момент прибытия в зону ликвидации последствий аварии составлял 18—21 год. Мы полагаем, что эта группа была призвана на действительную военную службу и направлена в зону ликвидации последствий аварии. По-видимому, данные дозиметрии для этих групп лиц в основном получены расчетным путем — маршрутная и групповая доза. Причем в большинстве случаев занесенная в РГМДР доза для этих групп экспозиционная и, следовательно, на 30% выше поглощенной.

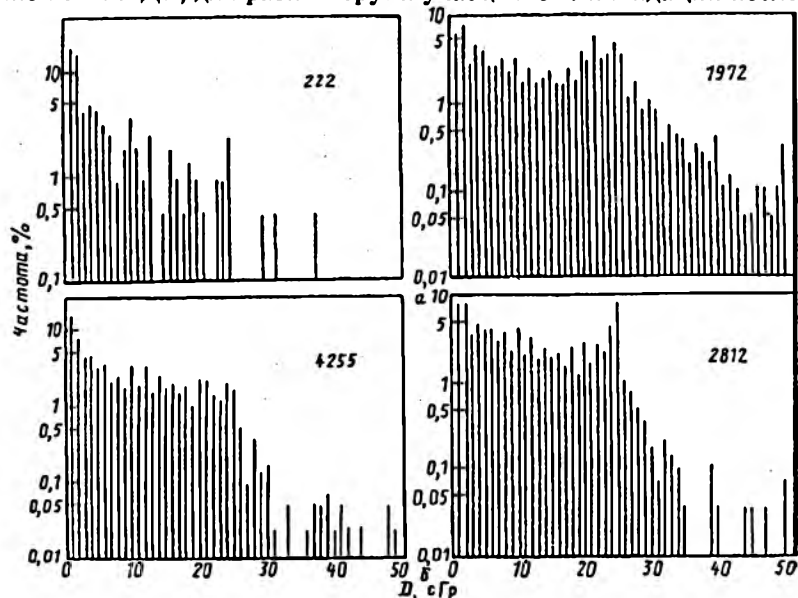
Проанализированы также данные ведомственного подрегистра ГНЦ РФ — Институт биофизики, который содержит главным образом сведения о лицах, командированных в зону ликвидации последствий аварии с предприятий и из учреждений Министерства среднего машиностроения. Такая группа насчитывает 18 323 чел., из них на 8689 чел. в настоящее время имеются дозиметрические данные. Доза этих лиц в основном определена с помощью индивидуального дозиметрического контроля, т.е. является поглощенной (в среднем на 30% меньше экспозиционной). Их лучевые нагрузки должны быть также ниже еще и потому, что в основном это были квалифицированные работники и, следовательно, не должны были при правильном индивидуальном дозиметрическом контроле подвергаться пересоблучению из-за последующей необходимости выведения из зоны ликвидации последствий аварии.

Анализ подтвердил сделанные предположения — форма плотности распределения дозы для профессиональных работников отличается от таковой для военнослужащих. В 1986 г. в распределении в группе военнослужащих имеется небольшой рост плотности при дозе 5, 10 сГр и существенный рост в интервале 20—25 сГр. При дозе 25 сГр плотность распределения резко уменьшается. В 1987 и 1988 гг. характер распределения почти не меняется, однако пики в распределении смещаются в область меньшей дозы в соответствии с установленными в то время дозовыми пределами. Анализ данных подтверждает уже известный факт, что военнослужащие выполняли самую неквалифицированную работу, что и обусловило их повышенные лучевые нагрузки.

Рассмотрим спектр дозовых нагрузок на участников ликвидации последствий аварии из ведомственных подрегистров (профессиональные работники и военнослужащие) с разной датой прибытия в зону ликвидации последствий аварии: с момента аварии и до начала строительства объекта «Укрытие» (20 мая 1986 г.) и во время его строительства — 21 мая—31 октября 1986 г. Доза, занесенная в РГМДР, для этих групп составляет 0,1—50 сГр. В группе военнослужащих в первом и втором временных интервалах целые значения дозы встречаются значительно чаще значений с дробной частью. Кроме того, с точностью до одного десятичного знака после запятой в спектре дозы встречаются почти все значения в интервале 0,1—50 сГр. В группе профессиональных работников целочисленные значения дозы встречаются меньшей степенью. По-видимому, такая значительно большая частота целочисленного значения дозы по сравнению с частотой значения с дробной частью означает, что она была получена расчетным путем с округлением до целых значений. Поэтому проведено сравнение спектров дозы, округленной до целых значений, для указанных групп и временных интервалов прибытия в зону ликвидации последствий аварии.

Как видно из рис. 4, с точностью до целочисленных значений спектры дозы для анализируемых групп участников ликвидации последствий аварии по форме близки и не содержат резких пиков. Это может служить косвенным аргументом того, что в 1986 г. точность оценки маршрутной дозы для подразделений Министерства обороны была ~ 1 сГр.

Следует отметить, что детальное исследование статистических характеристик дозы, занесенной в РГМДР, для разных групп участников ликвидации последствий ава-



Р и с. 4. Спектр округленной до целых значений дозы, занесенной в РГМДР, участников ликвидации последствий аварии ведомственных подрегистров ГПЗ РФ — Институт биофизики (слева) и Министерства обороны РФ (справа), прибывших в зону ликвидации последствий аварии до начала строительства объекта «Укрытие» (а) и в период его сооружения (б)

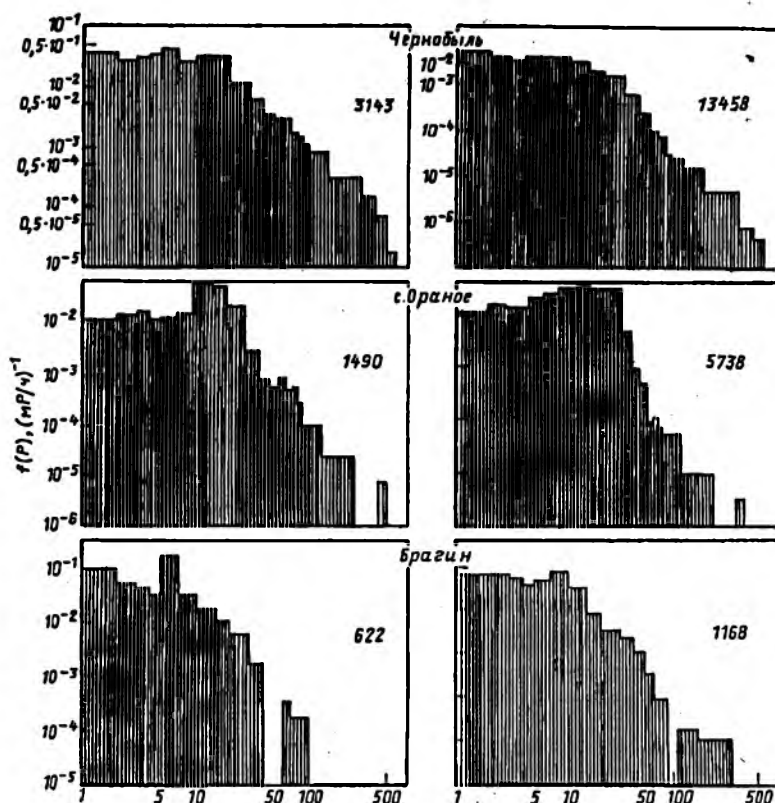
рии вынуждены делать из-за того, что при создании документов дозиметрической части Всесоюзного распределения регистра бывшего СССР (РГМДР — его правопреемник на территории России) не было предусмотрено указывать поля, методы оценки дозы, место, длительность и характер выполненных работ и многие другие данные, позволяющие оценить возможные лучевые нагрузки при отсутствии индивидуальных данных, а также верифицировать имеющиеся. В настоящее время в РГМДР подготовлена специальная карта опроса, которую предполагается заполнить единожды на каждого участника ликвидации последствий аварии при проведении очередного медицинского обследования и которая восполнит указанные пробелы.

Проанализируем дозиметрические данные, используя другой подход, — статистический анализ индивидуальной эффективной мощности дозы радиационного поля, в котором находился участник ликвидации последствий аварии. Введем понятие средней эффективной мощности экспозиционной дозы P : $P = kD/T$, мР/ч, где D — доза, занесенная в РГМДР для каждого участника ликвидации последствий аварии; T — длительность пребывания в зоне проведения работ; k — коэффициент, подбираемый так, чтобы размерность P представлялась в единицах мощности экспозиционной зоны, измеряемой полевыми радиометрами-дозиметрами, т.е. мР/ч.

Физический смысл вводимой величины состоит в том, что она указывает эффективную мощность экспозиционной дозы радиационного поля, в котором должен постоянно находиться участник ликвидации последствий аварии, чтобы получить лучевую нагрузку, равную занесенной в РГМДР. Разумеется, в реальных радиационных полях мощность экспозиционной дозы могла быть существенно выше эффективной как минимум в 4 раза при 6-часовом рабочем дне, так как в зоне проведения работ мощность экспозиционной дозы была существенно больше, чем в жилых помещениях. Тем не менее введение понятия эффективной мощности экспозиционной дозы может быть полезным при статистическом анализе. Это можно пояснить следующим образом. Длительность пребывания в зоне радиоактивного загрязнения является наиболее надежно зафиксированным параметром в РГМДР. Поэтому даже если предположить, что большая часть массива дозы РГМДР по некоторым причинам искажена, то в таком случае статистическое распределение эффективной мощности экспозиционной дозы может выявить группы с такого рода «административной» дозой.

Как видно из рис. 5, в Чернобыле распределение эффективной мощности экспозиционной дозы с момента аварии и до окончания строительства «Укрытия» почти не отличается — плотность $f(P)$ постоянна до 10 мР/ч и убывает по логарифмически нормальному закону до 500 мР/ч. Немного иной характер имеет распределение для с. Ораное (в основном участники ликвидации последствий аварии здесь — военнослужащие). Здесь плотность эффективной мощности экспозиционной дозы до начала строительства «Укрытия» постоянна до 10 мР/ч, затем резко возрастает в интервале 10—20 мР/ч и быстро падает до 300 мР/ч. В Брагине распределение эффективной мощности экспозиционной дозы похоже на таковое для с. Ораное, но смещено в область меньших значений. Следовательно, можно полагать, что часть дозы, занесенная в РГМДР для участников ликвидации последствий аварии из с. Ораное и Брагина с одинаковыми (близкими — области пиков в распределении $f(P)$) значениями эффективной мощности экспозиционной дозы, не является данными измерений, а получена иным способом (групповая или, скорее всего, маршрутная доза).

Рассмотрим распределение эффективной мощности экспозиционной дозы для уже обсуждавшихся групп из ведомственных подрегистров. Для подрегистра Министерства обороны распределение эффективной мощности экспозиционной дозы для 1986 г. близко к логарифмически нормальному с максимумом при $P \approx 10$ мР/ч, для профессиональных работников в 1986 г. его можно рассматривать как суперпозицию двух логарифмически нормальных распределений с максимумами ≈ 1 и 10 мР/ч. Это также не противоречит характеру работ, проводимых в зоне ликвидации последствий аварии, — одна часть профессиональных работников работала в эффективном радиаци-



Р и с. 5. Распределение эффективной мощности экспозиционной дозы с момента аварии до 20 мая 1986 г. (слева) и с 21 мая по 31 октября 1986 г. — время строительства объекта «Укрытие» (справа)

онном поле ~ 1 мР/ч (квалифицированная работа, не связанная с непосредственным длительным пребыванием в зоне сильного загрязнения), другая (наибольшая) — 10 мР/ч, как и военнослужащие. Указанные особенности распределений сохраняются и для последующих за 1986 г. периодов времени с учетом смещения максимумов в распределениях в сторону меньших значений в связи с улучшением радиационной обстановки.

Таким образом, анализ показал качественное соответствие эффективной мощности экспозиционной дозы участников ликвидации последствий аварии радиационной обстановке в зоне проведения работ и не выявил значительных по численности групп, лучевые нагрузки на которые не имеют приемлемой степени достоверности.

Средние лучевые нагрузки на участников ликвидации последствий аварии. Дополнительно к уже изложенному уместно привести некоторые средние характеристики проанализированных распределений.

На основании данных табл. 3 можно сделать заключение о динамике средних лучевых нагрузок во время проведения основных работ. Некоторое увеличение средней дозы для участников ликвидации последствий аварии, прибывших в зону в 1990 г., можно объяснить завершением массовых работ. Поэтому в зону направлялись лишь профессиональные работники. Это можно подтвердить также данными о средней длительности пребывания — она меньше, чем в 1989 г., и средней эффективной мощности экспозиционной дозы — она на 50% больше по сравнению с 1988—1989 гг. Размах распределений D , T , P достаточно большой, так как среднеквадратичные отклонения близки к средним значениям, а для распределения эффективной мощности экспозиционной дозы — значительно больше среднего значения. Это замечание также свидетельствует в пользу приемлемой достоверности дозиметрических данных РГМДР в целом. О достоверности каждого отдельного значения пока заключений сделать нельзя.

Т а б л и ц а 3. Средние дозовые нагрузки на участников ликвидации последствий аварии

Год	N , чел.	D , сГр	σ , сГр	T , сут	σ , сут	P , мР/ч	σ , мР/ч
1986	46575	15,9	8,3	70	72	19,2	45,5
1987	48077	9,0	5,8	79	59	6,8	19,8
1988	18208	3,3	3,5	106	58	2,0	14,8
1989	5475	3,2	3,6	102	60	1,9	6,7
1990	1004	3,7	2,9	86	58	2,5	7,3

Примечания. N — число участников ликвидации последствий аварии; D — средняя поглощенная доза; T — среднее время пребывания в зоне загрязнения; P — средняя эффективная мощность экспозиционной дозы; σ — среднеквадратичное отклонение распределений.

Из данных табл. 4 можно сделать заключение, что в 1986 г. средняя доза участников ликвидации последствий аварии в населенных пунктах, расположенных на расстоянии от Чернобыльской АЭС до 100 км, почти одинакова и в 2 раза выше, чем в дальней зоне. Средняя же эффективная мощность экспозиционной дозы монотонно уменьшалась с увеличением расстояния. Такой вывод справедлив и для последующих лет.

Т а б л и ц а 4. Средние дозовые нагрузки на участников ликвидации последствий аварии в зависимости от расстояния до Чернобыльской АЭС, км

Параметр	0—10	10—30	30—50	50—100	100—250
1986 г.					
N , чел.	2461	20362	16386	6976	390
D , сГр	14,8	14,8	17,8	15,4	8,5
σ , сГр	9,4	8,8	7,2	7,4	9,0
P , мР/ч	33,6	21,0	16,4	16,0	12,0
σ , мР/ч	84,5	53,0	24,9	38,8	27,7
1987 г.					
N , чел.	1612	15004	18417	12800	244
D , сГр	7,5	8,5	9,1	9,6	5,2
σ , сГр	6,5	6,1	5,5	5,5	5,7
P , мР/ч	5,7	6,8	7,0	6,8	2,3
σ , мР/ч	12,2	19,9	21,9	17,0	8,5

Таким образом, данные и этой таблицы подтверждают предварительный вывод о внутренней непротиворечивости массива дозы, занесенной в РГМДР, радиационной обстановке в зоне загрязнения и характере проводимых работ.

Полезно также рассмотреть средние статистические характеристики величин, связанных с лучевыми нагрузками на участников ликвидации последствий аварии для более узких групп. По данным табл. 5 средняя длительность пребывания участников ликвидации последствий аварии из дозовых групп 0—1, 0—5, 5—15, 15—50 сГр почти одинаковая, но эффективная мощность экспозиционной дозы отличается в 2,5 раз. Поэтому группу 0—5 сГр можно предложить в качестве контрольной при эпидемиологическом анализе показателей здоровья, а следующие две группы — как критические, с существенно разными дозовыми нагрузками.

Анализ данных табл. 6 показывает, что на начальном этапе доза участников ликвидации последствий аварии в Припяти и Чернобыле (около 4000 чел.) составила в среднем 16 сГр и примерно на 4 сГр меньше, чем в с. Ораное, Брагине и с. Термаховке, где в основном находились военнослужащие. Средняя эффективная мощность экспозиционной дозы в Припяти оказалась в 2 раза больше, чем в Чернобыле, и в 4—8 раз больше, чем в с. Ораное, Брагине и с. Термаховке. Причем также существенно, что се разброс для первых двух населенных пунктов более чем в 10 раз больше по сравнению с населенными пунктами, где находились военнослужащие.

Т а б л и ц а 5. Характеристики разных дозовых групп в 1986 г.

Дозовая группа, сГр	N, чел.	D, сГр	σ , сГр	P, мР/ч	σ , мР/ч	T, сут	σ , сут
0—50	46575	15,9	8,3	19,2	45,5	70	72
0—1	3064	0,5	0,3	1,2	3,3	66	103
0—5	7872	2,0	1,5	3,8	10,2	71	104
5—15	9718	10,4	2,8	14,5	32,9	79	84
15—50	28965	21,5	3,5	25,0	53,2	67	54

Т а б л и ц а 6. Средние характеристики дозовых нагрузок на участников ликвидации последствий аварии в 1986 г. для некоторых населенных пунктов и сроков проведения работ в зоне радиоактивного загрязнения

Населенный пункт	N, чел.	D, сГр	σ , сГр	P, мР/ч	σ , мР/ч	T, сут	σ , сут
26.04—20.05							
Все	8650	16,8	8,8	34,8	88,8	74	105
Чернобыль	3143	16,0	9,6	47,8	110,2	58	89
Припять	640	15,6	9,8	83,6	147,6	52	127
с.Ораное	1490	20,3	5,9	19,5	34,9	63	72
Брагин	622	17,8	9,1	10,4	30,0	162	122
с.Термаховка	338	20,3	4,8	14,0	15,0	70	39
21.05—31.10							
Все	31408	15,7	8,3	16,5	27,9	67	61
Чернобыль	13458	14,7	8,8	17,1	30,6	62	55
Припять	1468	14,5	9,3	16,5	28,8	67	84
с.Ораное	5738	19,8	5,7	22,2	28,2	53	40
Брагин	1168	14,7	5,5	9,4	16,8	114	87
с.Термаховка	410	18,4	6,1	17,3	15,7	63	58
Иванков	2945	16,2	7,2	14,5	24,2	71	53
с.Домановка	823	19,1	6,0	19,3	10,4	48	29

При анализе обсуждаемых данных следует также принять во внимание, что длительность пребывания участников ликвидации последствий аварии в указанных пунктах (кроме Брагина) близка. Такой парадокс можно объяснить тем, что, приезжая для выполнения работ на промплощадку, они в Припяти и Чернобыле получали значимые (близкие к дозовому пределу 25 сГр) дозовые нагрузки за гораздо меньший срок. Военнослужащие же, по-видимому, не покидали место дислокации и после получения значительной дозовой нагрузки. Возможно, есть и другие объяснения обсуждаемого парадокса, тем более что этот период после аварии был наименее обеспечен должным дозиметрическим контролем.

Во время строительства объекта «Укрытие» средние лучевые нагрузки участников ликвидации последствий аварии (нижняя часть табл. 6) обсуждаемых населенных пунктов близки, эффективная мощность экспозиционной дозы для этих контингентов также не отличается значительно, т.е. в этот период, когда был налажен дозиметрический контроль, не наблюдается парадокса, отмеченного для начальной стадии, хотя некоторые сомнения вызывает доза, полученная за время строительства объекта «Укрытие» в с. Домановке.

В заключение приведем средние лучевые нагрузки, занесенные в РГМДР из ведомственных подрегистров. Эти данные уже обсуждались. Анализ табл. 7 показывает, что среднеквадратичные отклонения распределений параметров D, T близки к средним

значениям, а для распределения эффективной мощности экспозиционной дозы среднеквадратичное отклонение может быть значительно больше среднего значения. Это свидетельствует в пользу того, что доля недостоверных данных (приписанных значений по каким-либо субъективным причинам) невелика. В противном случае дисперсия распределений была бы значительно меньше.

Т а б л и ц а 7. Средние дозовые нагрузки на участников ликвидации последствий аварии из ведомственных подрегистров

Год	N , чел.	D , сГр	σ , сГр	T , сут	σ , мР/ч	P , мР/ч	σ , мР/ч
Профессиональные работники (ГНЦ РФ — Институт биофизики)							
1986	4870	7,0	8,0	51	61	8,5	20,8
1987	2490	2,6	3,7	72	91	2,4	5,2
1988	948	2,4	3,0	70	58	2,1	6,9
1989	346	1,4	2,0	90	72	1,0	2,6
1990	35	1,6	1,9	81	135	2,1	4,1
Кадровый состав Министерства обороны РФ							
1986	5425	12,5	9,7	65	90	34,1	95,1
1987	7679	8,5	6,6	78	52	7,0	20,4
1988	2249	3,7	3,5	97	50	2,1	4,9
1989	1637	4,0	4,0	100	46	2,3	7,9
1990	619	4,0	3,5	82	41	2,9	9,2
Военнослужащие срочной службы							
1986	3162	15,2	8,4	94	129	23,6	55,0
1987	834	8,2	6,6	158	187	9,6	51,5
1988	128	5,9	7,9	257	257	3,0	7,6
1989	36	3,7	6,5	251	251	1,9	7,0
1990	17	2,8	3,3	160	232	1,3	1,7

Следует отметить, что, анализируя данные таблиц, нельзя пользоваться соотношением $D = PT$, так как P является средним значением отношения индивидуальной дозы к индивидуальному времени пребывания участника ликвидации последствий аварии в зоне и поэтому в общем случае не равно отношению средних значений D и T . Сравнивая среднюю дозу из обсуждаемых в настоящей статье подрегистров, следует учитывать, что доза из подрегистра Министерства обороны, как правило, должна быть уменьшена в среднем на 30%, так как это экспозиционная доза. С учетом этого замечания средняя доза участников ликвидации последствий аварии 1986 г. из контингента военнослужащих после введения коэффициента перехода от экспозиционной дозы к поглощенной становится равной 8,8 сГр, что близко к средней дозе для подрегистра профессиональных работников. Средняя эффективная мощность экспозиционной дозы для подрегистра Министерства обороны в 1986 г. значительно больше, чем для подрегистра профессиональных работников, что объяснимо известным фактом — военнослужащие выполняли в зоне самую неквалифицированную работу и, следовательно, подверглись наибольшему радиационному воздействию.

Заключение. Таким образом, анализ дозиметрической информации, занесенной в РГМДР, не выявил больших групп заведомо недостоверных данных. Для верификации индивидуальных значений следует провести работу по сбору информации об индивидуальных маршрутах каждого участника ликвидации последствий аварии в зоне и сопоставить затем занесенную в РГМДР дозу с радиационной обстановкой на маршруте с учетом характера, длительности работы на нем. К такого рода работе РГМДР уже приступил в 1995 г.

Мы признательны сотрудникам НПО «Припять», в частности, С.В. Козакову (НТЦ), Ю.П. Иванову (Управление дозиметрического контроля) за полезную информацию, полученную от руководимых ими служб. Мы отдельно выражаем благодарность Л.А. Ильину за полезные обсуждения рассмотренных в статье проблем и написание нужной книги «Реалии и мифы Чернобыля» (М., ALARA Limited, 1994).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернобыльская катастрофа: причины и последствия (экспертное заключение), ч. 1. Непосредственные причины аварии на Чернобыльской АЭС. Дозиметрический контроль, меры защиты и их эффективность. Под ред. В.Б. Нестеренко, Д.С. Фирсова. Минск, МС СЭНМУРВ, 1993.
2. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред. Под ред. Ю.А. Израэль. С.-Петербург: Гидрометеониздат, 1990.
3. Иванов В.К., Цыб А.Ф. Радиационно-эпидемиологические исследования в системе Российского национального Чернобыльского регистра. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 1994, № 2—3, с. 44—53.
4. Иванов В.К., Цыб А.Ф., Максютин М.А. и др. Радиационно-эпидемиологический анализ данных РГМДР об участниках ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. — Атомная энергия, 1995, т. 78, вып. 2, с. 121—127.

Поступила в Редакцию 15.05.95

Р е ф е р а т ы с т а т е й

УДК 621.039.522+621.384.6

Алексеев П.Н., Игнатьев В.В., Коляскин О.Е., Мостовой В.И., Меньшиков Л.И., Прусаков В.Н., Пономарев-Степной Н.Н., Субботин С.А., Аленицкий Ю.Г., Красных А.К., Сомов Л.Н. Каскадный подкритический реактор повышенной безопасности. — Атомная энергия, 1995, т. 79, вып. 5, с. 327—337.

Показано, что проблемы безопасности и эффективности будущей ядерной энергетики и ее топливного цикла во многом могут быть решены добавлением в систему дополнительно к тепловым и быстрым реакторам подкритических жидкосолевых (КЖСР), питаемых внешним источником нейтронов, которые получены на основе протонных или электронных ускорителей.

Рассмотрена каскадная схема КЖСР, состоящая из двух активных зон: внутренней — на быстрых нейтронах и внешней — на тепловых нейтронах с подавленной обратной связью между ними. Такая схема позволяет резко снизить мощность внешнего источника нейтронов. В качестве наиболее перспективных указаны источники нейтронов на основе линейных резонансных электронных ускорителей или секторных протонных циклотронов. Указано на принципиальную возможность ядерной энергетики на основе только одного типа реактора — КЖСР, что ведет к упрощению и удешевлению всего ядерного топливного цикла. Рис. 2, табл. 1, список лит. 31 назв.

УДК 621.039.58

Симонов К.В., Немеш И. Совершенствование топливоиспользования и режимов эксплуатации АЭС «Пакш». — Атомная энергия, 1995, т. 79, вып. 5, с. 337—343.

Кратко представлены результаты научно-технических разработок по совершенствованию топли-

воиспользования и режимов эксплуатации АЭС «Пакш», выполненных совместно специалистами РНЦ «Курчатовский ин-т» и АЭС «Пакш». Обосновано увеличение глубины выгорания топлива, используемого на АЭС, приведены нейтронно-физические характеристики 4-годичного топливного цикла с повышенным выгоранием. Проведена экспертиза и реализован на первом энергоблоке новый для ВВЭР-440 подход к контролю распределения энерговыделения активной зоны, заключающийся в непосредственном ограничении мощности максимально нагруженного твэла. Выполнено тестирование методов восстановления энергораспределения, лежащих в основе принципа контроля энергораспределения по «горячей точке». Публикуются результаты расчетно-экспериментальных исследований работоспособности твэлов второго энергоблока при маневрировании мощностью реактора. Список лит. 12 назв.

УДК 621.039.56

Булавин В.В., Павелко В.И., Гуцев Д.Ф. Исследования характеристик вибродиагностики ВВЭР-1000 в эксплуатационных условиях. — Атомная энергия, 1995, т. 79, вып. 5, с. 343—349.

По авто-, взаимным и многомерным спектральным характеристикам шумов трех типов датчиков рассмотрены амплитудные, фазовые, гармонические и многомерные авторегрессионные признаки вибраций внутрикорпусных устройств ВВЭР-1000. Рис. 12, табл. 2, список лит. 3 назв.

УДК 621.181.021

Иванов Е.А., Пырклов И.В., Хамьянов Л.П. Контроль герметичности парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000 после реконструкции систем