

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rest J., Zawadzki S. FASTGRASS: A Mechanistic Model for the Prediction of Xe, I, Cs, Te, Ba and Sr Release from Nuclear Fuel under Normal and Severe-Accident Conditions. NUREG/CR-5840, ANL-93/3, 1992.
2. Rest J. The prediction of transient fission-gas release and fuel microcracking under severe core-accident conditions. — Nucl. Technol., 1982, v. 56, p. 553—564.
3. Rest J., Cronenberg A. Modelling the behavior of Xe, I, Cs, Te, Ba and Sr in solid and liquefied fuel during severe accidents. — J. Nucl. Mater., 1987, v. 150, p. 203—225.
4. Small G. and Macinnes D. Singar «A» and «B»: Simplified Models for Fission Gas Release in Transients. Rep. AERE R-12803, Harwell Laboratory, 1988.
5. Small G. Fission Gas Release from Uranium Dioxide in High-Temperature Transients. Rep. AERE R-12956, Harwell Laboratory, 1988.
6. Loyalka S. Mechanics of aerosol in reactor safety: a review. — Progress Nucl. Energy, 1983, v. 12, p. 1—56.
7. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М., 1959.

Поступила в Редакцию 12.07.94

УДК 621.039.76

ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ ГРУППЫ С БЛИЗКИМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ
ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ

*Коренков И.П., Воронин К.В., Александрова А.И. (РМАПО),
Польский О.Г., Соболев А.И., Вербова Л.Ф. (МосНПО «Радон»)*

В настоящее время воздействию ионизирующего излучения подвергаются широкие слои населения, и особо пристального внимания требуют люди, по роду своей деятельности непосредственно контактирующие с радиоактивными веществами и источниками ионизирующего излучения. Наиболее часто такие вещества используются в медицине, науке и промышленности. Цель настоящей работы — по результатам индивидуального дозиметрического контроля за 1989—1993 гг. выделить профессиональные группы со статистически подобными характеристиками, получить зависимости для оценки вероятности получения персоналом такой группы любой заданной дозы суммарного внешнего и внутреннего облучения и определить степень радиационного риска на основе оцен. и вероятности превышения персоналом годовой предельно допустимой дозы.

На протяжении нескольких лет нами проводился массовый индивидуальный контроль за облучением персонала более 50 различных медицинских и научных учреждений и промышленных предприятий. Дозу облучения регистрировали термолюминесцентными дозиметрами типа ДТУ-02 с детектором TLD-500K на основе Al_2O_3 . Предел чувствительности таких дозиметров составляет ~ 10 мбэр. Полученные нами первичные данные были разбиты по виду облучения, профессии, типу предприятия и годам на подгруппы, для которых рассчитывали статистические параметры распределения и проверяли их на соответствие нормальному или логарифмически нормальному закону по критерию согласия W^2 [1]. Этот критерий в отличие, например, от широко известного критерия Пирсона не требует группирования данных по интервалам и поэтому свободен от неизбежной потери части информации при малом их числе. Вычисляется значение $W^2 = 1/12n + \sum [P(x) - F(x)]^2$, где n — число членов ряда; $P(x)$ — функция нормального или логарифмически нормального распределения; $F(x)$ — накопленная частота, которая определяется для x_i , перегруппированных в порядке возрастания значений, по формуле

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x < x_1; \\ i/n, & x_i \leq x \leq x_n; \\ 1, & x \geq x_n. \end{cases}$$

Если полученное значение $W^2 \leq W_{кр}$ (для уровня значимости $\alpha = 0,01$, $W_{кр} = 0,743$), то данные соответствуют выбранному закону распределения.

При разбиении данных по годам для получения представительных выборок рассматривали шесть подгрупп: медицинские, научные учреждения и промышленные предприятия отдельно для γ - и рентгеновского облучения (табл. 1). Заметных изменений средних значений по годам ни для одной подгруппы не выявлено. Из табл. 2 видно, что среди статистически представительных выборок наибольшая средняя по подгруппе доза D получена научными сотрудниками медицинских учреждений при работе с рентгеновским излучением, наименьшая наблюдается в подгруппе прочих работающих с γ -источниками, куда вошли руководители учреждений, секторов и лица, для которых в базе данных не указана должность.

Т а б л и ц а 1. Статистические параметры индивидуальной дозы облучения сотрудников по отраслям и виду излучения

Год	Численность персонала	Средняя доза, мбэр/год	Средне-квадратичное отклонение	Минимальная доза, мбэр/год	Максимальная доза, мбэр/год	W^2 (нормальный)	W^2 (логарифмический нормальный)
γ-Излучение							
Медицинские учреждения							
1989	105	218	127	20	785	0,794	0,351
1990	89	252	266	15	1635	5,402	0,104
1991	66	141	113	20	775	1,916	0,173
1992	9	187	75	85	325	0,040	0,031
1993	108	210	73	90	715	0,492	0,084
Научные учреждения							
1990	20	143	139	15	630	0,938	0,054
1992	45	102	32	40	175	0,168	0,377
1993	57	256	71	80	380	1,062	1,546
Промышленные предприятия							
1990	5	155	35	125	210	0,074	0,259
1991	5	161	38	125	205	0,089	0,221
1992	21	178	129	60	485	0,601	0,375
1993	12	155	40	70	205	0,057	0,080
Рентгеновское излучение							
Медицинские учреждения							
1989	99	334	315	30	2005	4,967	0,075
1990	296	178	394	10	4680	51,286	2,143
1991	105	92	161	10	1345	15,105	0,644
1992	322	276	924	10	9965	76,446	3,088
1993	404	227	347	30	4920	46,576	1,141
Научные учреждения							
1989	14	111	39	30	175	0,165	0,337
1990	27	190	142	60	610	0,738	0,228
1991	9	176	43	110	230	0,057	0,053
1993	16	415	358	115	1330	0,718	0,180
Промышленные предприятия							
1989	94	239	186	75	1550	3,367	0,486
1990	40	223	282	30	1850	4,014	0,268
1991	18	121	25	70	160	0,059	0,073
1992	63	200	224	40	1445	5,044	0,302
1993	109	189	107	85	610	1,740	0,938

Т а б л и ц а 2. Статистические параметры индивидуальной дозы облучения сотрудников по профессиональным группам и виду излучения

Профессиональная группа	Численность персонала	Средняя доза, мбэр/год	Среднеквадратичное отклонение, мбэр/год	Минимальная доза, мбэр/год	Максимальная доза, мбэр/год	W^2 (нормальный)	W^2 (логарифмически нормальный)
γ-Излучение							
Медицинские учреждения							
ИТР	22	248	159	20	775	0,221	0,274
Научные сотрудники	37	194	101	40	490	0,390	0,107
Врачи	58	202	136	15	710	1,118	0,171
Младший медицинский персонал	150	231	183	30	1635	4,482	0,191
Санитарки	64	203	182	25	1360	2,881	0,260
Прочие	46	151	113	20	715	0,855	0,040
Итого по отрасли	377	210	162	15	1635	9,861	0,774
Научные учреждения							
ИТР	49	194	94	25	380	0,401	0,301
Научные сотрудники	45	204	118	15	630	0,418	0,312
Прочие	28	110	67	40	320	0,439	0,157
Итого по отрасли	122	181	105	15	630	1,138	0,473
Промышленные предприятия							
Медицинский персонал	20	156	96	65	485	0,484	0,178
Рабочие	20	189	92	60	400	0,171	0,06
Прочие	3	87	16	75	105	0,059	0,224
Итого по отрасли	43	167	94	60	485	0,591	0,145
Рентгеновское излучение							
Медицинские учреждения							
ИТР	40	137	131	20	775	1,935	0,106
Научные сотрудники	48	376	626	65	3935	6,431	0,511
Врачи	323	206	367	10	4680	42,672	0,641
Младший медицинский персонал	644	244	703	10	9965	134,117	2,413
Санитарки	110	150	100	10	570	1,849	0,590
Прочие	61	203	170	20	1190	1,993	0,073
Итого по отрасли	1226	225	561	10	9965	225,958	3,678

Окончание табл. 2 на с. 148

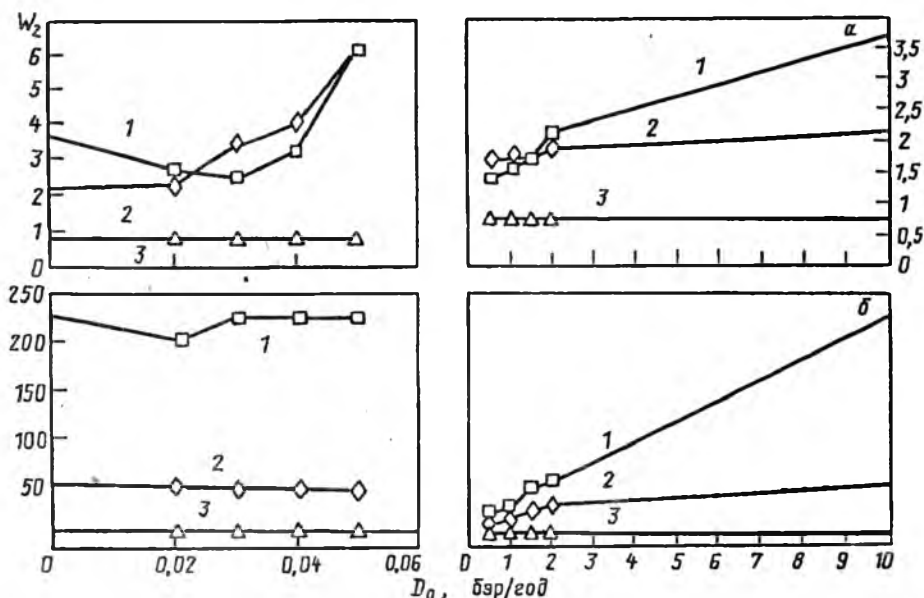
Окончание табл. 2

Профессиональная группа	Численность персонала	Средняя доза, мбэр/год	Среднеквадратичное отклонение, мбэр/год	Минимальная доза, мбэр/год	Максимальная доза, мбэр/год	W^2 (нормальный)	W^2 (логарифмически нормальный)
Научные учреждения							
ИТР	23	142	62	60	305	0,209	0,079
Научные сотрудники	34	257	285	30	1330	2,603	0,119
Медицинский персонал	7	256	124	115	475	0,065	0,116
Итого по отрасли	66	226	225	30	1330	3,887	0,158
Промышленные предприятия							
ИТР	58	206	200	40	1550	3,298	0,186
Научные сотрудники	8	216	62	155	330	0,058	0,219
Рабочие	176	188	160	30	1850	8,029	0,628
Прочие	82	245	222	85	1445	3,992	1,114
Итого по отрасли	324	206	184	30	1850	15,903	0,927

В основном данные подчиняются логарифмически нормальному закону, что впервые было отмечено в работе [2], систематизирующей исследования зарубежных авторов по дозе профессионального облучения. В отдельных случаях, например, для групп «прочие» промышленных предприятий и «младший медицинский персонал» медицинских учреждений при работе с рентгеновскими источниками или медицинских учреждений за 1990 и 1992 годы это правило нарушается. Обнаружены как неоправданно низкие (10—15 мбэр в год), так и необоснованно высокие значения дозы (более 2000 мбэр за квартал). Очевидно, что отклонение распределений от логарифмически нормального или нормального закона вызвано наличием различных погрешностей. Нами была сделана попытка оценить степень их влияния на вид закона распределения. Было взято несколько выборок, не соответствующих ни одному названному закону. Каждую из них модифицировали путем отбрасывания экстремальных значений $D > D_0$ или $D < D_0$ (D_0 — порог отсеечения) и внесения поправок на постоянное смещение. Для каждой модифицированной выборки вычисляли W^2 и статистические параметры в предположении о нормальном или логарифмически нормальном распределении. Пример изменения W^2 в зависимости от порога «отсекаемой» дозы D_0 со стороны малых и больших значений D приведен на рис. 1.

Из полученных результатов следует, что постепенное отбрасывание значений $D_0 \geq 1500$ мбэр в год, являющихся резкими отклонениями, число которых не превышает 2%, приводит к уменьшению W^2 , т.е. к большему соответствию данных теоретическому распределению для двух рассматриваемых типов законов. Однако W^2 так и не достигают $W_{кр}^2$ для нормального закона, почти вплотную приближаясь к нему на принятом уровне значимости для логарифмически нормального закона.

Доза более 1,5—2 бэр в год для всех рассматриваемых предприятий представляет собой редкий случайный выброс, обусловленный как ошибкой оператора или сбоем в работе аппаратуры, так и действитель-



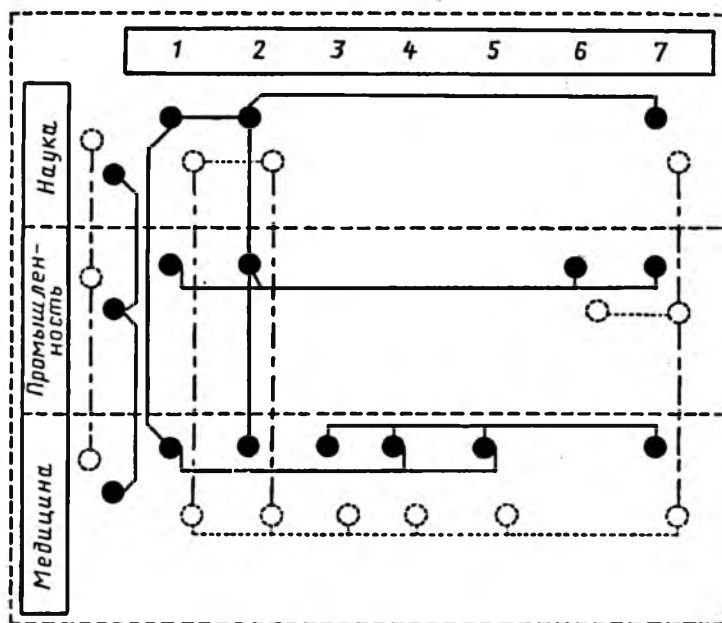
Р и с. 1. Степень соответствия отдельных выборок логарифмически нормальному (а) и нормальному закону (б) распределения при отсечении D_0 в области малой (слева) и большой (справа) дозы: 1, 2 — обобщенные данные по всем медицинским учреждениям и данные по медицинским учреждениям за 1990 г. (рентгеновское излучение) соответственно; 3 — предельное W^2

но повышенной дозой облучения (из-за нарушения правил безопасности или вследствие преднамеренного облучения детектора), что в каждом отдельном случае требует выявления истинных причин. Поскольку доза не является характерной для любой из рассматриваемых групп и отбрасывание лишь увеличивает соответствие первичных данных теоретическим законам распределения, такая операция при определении общих статистических закономерностей выборки представляется оправданной.

Отбрасывание низких значений $D < D_0$ чаще приводит к увеличению W^2 для логарифмически нормального распределения, оставляя почти неизменным этот показатель для нормального закона. В этом диапазоне в качестве максимального отбрасываемого значения предложена $D_0 = 40-50$ мбэр в год (квартальная доза не менее 10 мбэр). Присутствие в годовых данных более низких значений D объясняется малодостоверной исходной информацией, в качестве которой использованы данные только за один-два квартала. Анализ показывает, что к отбрасыванию малых D при предположении логарифмически нормального распределения следует подходить с осторожностью.

Внесение в первичные данные поправки на постоянное смещение показаний дозиметров, взятой из работы [3] и изменяющейся по экспоненциальному закону, немного уменьшает W^2 , но не оказывает существенного влияния на вид закона распределения.

При дальнейшей обработке в целях определения значимости различий статистических параметров всех подгрупп использовали критерий Фишера F для дисперсий и критерий Стьюдента t для средних [1]. В каждой анализируемой подгруппе отбрасывали экстремальные значения больше 3 бэр/год, выборки, параметры которых различались статистически незначимо, объединяли в более общие группы (рис. 2). В результате установлено, что среди научных учреждений подгруппы ИТР и научных сотрудников составляют одну совокупность для γ - и рентгеновского облучения. Для медицинских учреждений, использующих γ -излучение, деление на подгруппы по профессиям не оправдано, данные принадлежат одной совокупности. Для рентгеновского облучения необходимо выделить подгруппу научных сотрудников, все остальные под-



Р и с. 2. Объединение групп с близким распределением индивидуальной дозы: ○, ● — γ - и рентгеновское излучение соответственно; 1 — инженерно-технические работники; 2 — научные сотрудники; 3 — младший медицинский персонал; 4 — врачи; 5 — санитарки; 6 — рабочие; 7 — работники остальных профессий, не вошедшие в перечень

группы принадлежат одной совокупности. При анализе по профессиям в различных отраслях подгруппы ИТР медицинских и научных учреждений для каждого вида излучения представляют собой одну совокупность. Подгруппу научных сотрудников для всех типов учреждений целесообразно объединить в одну.

Подгруппы, параметры распределения которых согласно статистическим критериям принадлежат одной совокупности, можно описывать единым законом распределения. Статистические параметры такого закона определяли путем объединения данных о значениях логарифмов индивидуальной дозы, входящих в эти подгруппы, в одну общую группу. Именно эти параметры использовали для оценок вероятности достижения персоналом той или иной дозы.

В работе [4] оценен риск для персонала, относящегося к той или иной группе. В качестве одномерной оценки риска было использовано численное значение вероятности получения годовой дозы облучения, равной или превышающей предельно допустимую. Нам представляется важным для практики радиационной защиты кроме риска иметь возможность прогнозировать вероятность получения сотрудником, принадлежащим к определенной профессиональной группе, любой дозы $D_{\text{пор}}$, не обязательно превышающей предельно допустимую, и для этого необходимо иметь всю вероятностную кривую. Вероятность получения персоналом группы дозы, меньшей или равной $D_{\text{пор}}$, оп-

ределяется по формуле $P = \int_0^{D_{\text{пор}}} f(x) dx$, где $f(x)$ — плотность вероятности закона распре-

деления, принятого для данной группы; $D_{\text{пор}}$ — доза в интервале от минимальной до максимальной по группе, взятая с шагом 0,1 бэр. При расчетах нами использовались численные методы интегрирования. Конечной целью данной работы было получение вероятностных кривых. Первичные данные, как было показано, имеют погрешности, и их можно иногда аппроксимировать и нормальным, и логарифмически нормальным законом. Представлялось интересным сравнение для одной и той же группы данных

кривых, полученных в предположении различных законов, а также для одного и того же закона после отсечения экстремальных значений в первичных данных.

Изменения вероятностных кривых для выборки, характеризующей рентгеновское облучение персонала в медицинских учреждениях за 1990 г. при аппроксимации ее нормальным (1) и логарифмически нормальным законом (2) по сравнению с экспериментальными данными (3), иллюстрируются рис. 3, а. Даже при наличии грубых отклонений в исходных данных вероятностные кривые, рассчитанные в предположении логарифмически нормального распределения, существенно меньше отклоняются от реальных данных, чем аппроксимированные нормальным законом. Для зависимостей, полученных в предположении нормального закона, различие между кривыми может сохраняться в широком диапазоне обычной (не экстремальной) дозы облучения и достигать 40%, для логарифмически нормальной аппроксимации оно не превышает 10%.

В случае аппроксимации данных нормальным законом (см. рис. 3, б) разброс кривых в диапазоне дозы облучения до 500 мбэр/год составляет от 10 до 25%. При аппроксимации данных логарифмически нормальным законом (см. рис. 3, в) максимальная разница между кривыми не превышает 10%.

Следовательно, для оценки вероятности получения сотрудником дозы, не превышающей $D_{\text{пор}}$, в любом случае следует исходить из предположения логарифмически нормального распределения данных об индивидуальной дозе облучения персонала, поскольку это приводит к небольшим погрешностям во всем диапазоне рассматриваемой дозы.

Вероятностные кривые, рассчитанные в предположении логарифмически нормального распределения дозы, с обобщенными данными приведены на рис. 4. Там же указан риск, рассчитанный по методике работы [4]. Подобные номограммы могут быть получены для любого предприятия и специалистов каждой профессии.

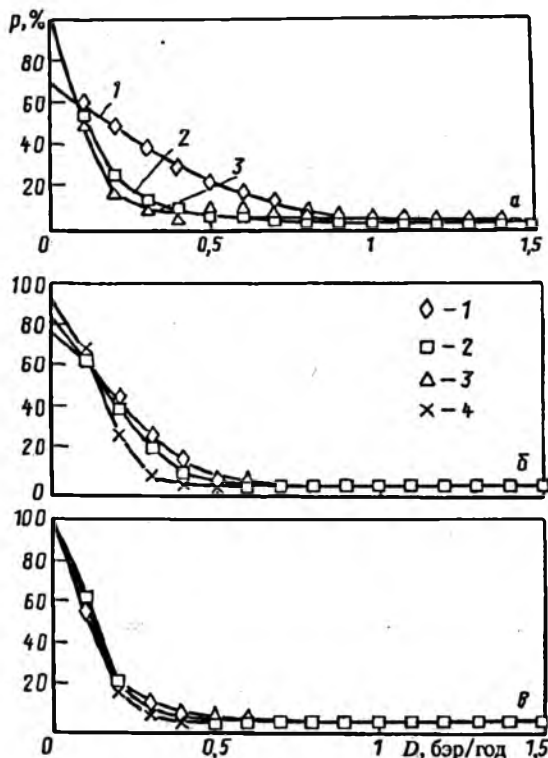


Рис. 3. Вероятностные кривые для первичных данных о дозе облучения в медицинских учреждениях в зависимости от аппроксимирующего закона (а) и аппроксимация тех же данных нормальным (б) и логарифмически нормальным законом (в) в зависимости от отсечения $D \leq D_0 = 2000$ (1), $20 \leq D \leq 1500$ (2), $30 \leq D \leq 1500$ (3), $20 \leq D \leq 800$ мбэр/год (4)

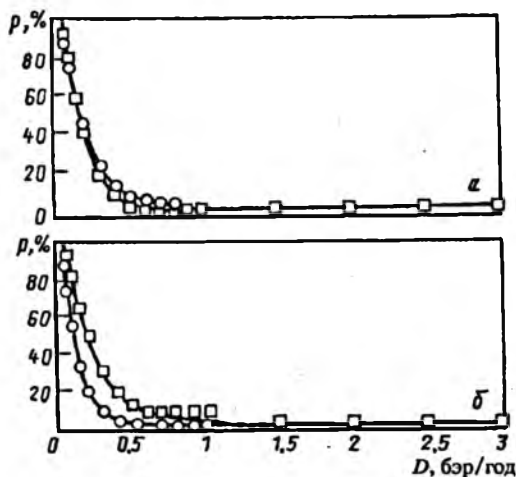


Рис. 4. Вероятность превышения указанной дозы для обобщенных по всем отраслям групп ИТР (○) и научных сотрудников (□) при γ - (а) и рентгеновском облучении (б); риск для ИТР и научных сотрудников $3 \cdot 10^{-5}$ и $8 \cdot 10^{-8}$ (а), $4 \cdot 10^{-7}$ и $4 \cdot 10^{-4}$ (б)

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

возможно статистически достоверно сформировать профессиональные группы однородно облучаемых лиц в пределах отрасли и в различных отраслях с близким распределением дозы облучения;

наибольшую индивидуальную дозу в 1989—1993 гг. получали научные сотрудники медицинских учреждений при работе в полях рентгеновского излучения. Во всех выделенных профессиональных группах отсутствуют статистически достоверные изменения средней годовой индивидуальной дозы облучения;

при расчете вероятности получения персоналом любой из групп дозы облучения $D_{\text{пор}} < \text{ПДД}$ наилучшее приближение к реальной зависимости обеспечивает предположение логарифмически нормального распределения дозы. На строгость такого распределения индивидуальной дозы персонала большее влияние оказывает низкая доза.

Авторы выражают искреннюю благодарность и признательность Ю.В. Сивинцеву за ценные советы и критические замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 648 с.
2. Источники и действие ионизирующей радиации. Доклад ИКДАР ООН в 1977 г., т. II, приложение E, Нью-Йорк, 1978.
3. Соболев А.И., Польский О.Г., Шанин О.Б. и др. Сравнительный анализ дозиметров при проведении радиозкологического мониторинга. — Атомная энергия, 1994, т. 77, вып. 3, с. 207—210.
4. Коренков И.П., Козлов А.А., Соболев А.И. и др. Анализ облучения персонала, работающего с источниками ионизирующего излучения. — Там же, 1990, т. 68, вып. 6, с. 420—425.

Поступила в Редакцию 4.05.95

УДК 621.039.51

МОЖЕТ ЛИ ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА ИСЧЕЗНУТЬ БЕССЛЕДНО?

Немировский П.Э. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)

В настоящее время атомная энергия является единственным источником, способным с минимальным ущербом для окружающей среды удовлетворять растущие энергетические потребности человечества в течение многих столетий. Но над ней еще долго будет витать угроза нового Чернобыля, а ее радиоактивные отходы будут заботой не только ее непосредственных потребителей, но и их дальних потомков. Поэтому в далеком будущем возможен полный отказ от нее из-за перехода на иные, экологически более приемлемые источники энергии либо принципиально новые, либо, наоборот, старые. При таком отказе совершенно естественным будет желание восстановить радиационный и химический балансы в природе на уровне, предшествовавшем появлению ядерной энергетики. Восстановлению первого, связанного в основном с радиоактивными осколками деления и конструкционными материалами, в значительной степени поможет само время, и ниже будут высказаны еще некоторые соображения по этому поводу. Что касается химического баланса, то речь идет о долгоживущих трансурановых элементах, отсутствующих в природе. Мы полагаем, что наиболее просто проблема трансурановых элементов может быть решена путем их сжигания в быстрых реакторах. Отметим сразу, что аналогичные исследования проводились и ранее [1], но в них рассматривались малые реакторы с высокоэнергетическим спектром нейтронов, в которых плохо выгорали $^{241,243}\text{Am}$. Ниже мы приводим некоторые соображения, позволяющие надеяться, что выжигание трансурановых элементов в быстрых реакторах возможно.