

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 1993

УДК [616.24—008.925.467.9+616—008.925.467.9]—074

В.А.Кутков, Ю.Б.Муравьев, З.С.Арефьева, О.И.Камарицкая

«ГОРЯЧИЕ ЧАСТИЦЫ» — ВЗГЛЯД СПУСТЯ СЕМЬ ЛЕТ ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Институт биофизики Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва

«HOT PARTICLES». THE VIEW AFTER 7 YEARS SINCE THE DAMAGE IN THE CHERNOBYL ATOMIC STATION

V.A.Kutkov, Y.B.Muraviev, Z.S.Arefieva, O.I.Kamaritskaya.

S u m m a r y

In the article, problems of nuclear pollution with products of the nuclear fuel division are analyzed. The chronology of the development of negative consequences of the damage is described. Features of the «hot particles» exploded into the air during the period of damage liquidation are analyzed. The particles are divided to following types: the first type includes the particles appearing after nuclear fuel dispersion; the second one is presented by volatilable particles condensed from explosion gas clouds. The most unstudied domain is the interaction of the human being with the latter type of particles.

It was discovered that in general the particles of the first type are presented by unsoluble compounds of ^{137}Cs coupled with the uranium fuel matrix.

Moreover, in the article, the question about the estimation of the internal radiation is pointed. That problem is solved with mathematical models describing the particles behavior in the human organism. That behavior depends on two chief factors: the dispersity of the particles and their transportability through the alveo-capillar barrier. The chemical destruction is the basic process inducting radionuclide entrance into blood through the pulmonary interstition. The further behavior of the particles depends on their dispersion. In case of the first factor, the particles smaller than 1 μm are spoken about, because the larger ones precipitates on the nasal mucus lamina and then follows into digestive tractus. The level of the second factor influence is ranged into three inhalational classes: D, Y and W (day, year and week). For true estimation of internal radiation doses it is necessary to evaluate the belonging of each radionuclide to specific class. That models were confirmed by results of the damage witnesses investigation.

The authors emphasized the necessity of the building of theory of the tumor development under influence of the «hot particles» to obtain vital risk estimations of inhalation radionuclides entrance.

Р е з ю м е

В статье анализируются проблемы радиоактивного загрязнения продуктами деления ядерного топлива. Описывается хронология развития негативных последствий аварии. Анализируются качественные особенности горячих частиц, выброшенных в атмосферу в период ликвидации самой аварии. Эти частицы подразделяются на два типа: 1-й — последствия диспергирования топлива и 2-й — летучие частицы, получившиеся в результате конденсации газовых облаков выброса на различных предметах. Взаимодействие человека с частицами первого типа является наименее изученным.

Было обнаружено, что в основном частицы первого типа представлены нерастворимыми соединениями ^{137}Cs , связанных с урановой топливной матрицей.

В настоящей статье ставится вопрос об оценке внутреннего облучения. Авторы решают эту проблему посредством математических моделей, описывающих поведение частиц внутри организма человека. Это поведение зависит от двух основных факторов: дисперсности частиц и их транспортабельности через альвеолокапиллярный барьер. Химическая деструкция является основным процессом, приводящим к проникновению радионуклидов в кровь через легочный интерстиций. В случае рассмотрения первого фактора речь идет о частицах размером 1 μm , так как более крупные оседают преимущественно в носоглотке и попадают затем в желудочно-кишечный тракт. Уровень влияния второго фактора ранжируется по трем ингаляционным классам: D, Y и W (день, год и неделя). Для правильной оценки доз внутреннего облучения необходимо оценить для каждого радионуклида его принадлежность к своему классу.

Эти модели были подтверждены результатами обследований свидетелей аварии.

Авторы указывают на необходимость построения теории образования опухолей под воздействием горячих частиц для того, чтобы получить необходимые оценки риска ингаляционного поступления радионуклидов.

Чернобыльская катастрофа заставила миллионы людей почувствовать опасность, заключенную в использовании человеком высоких технологий, среди которых атомная энергетика является лишь одной из многих. Стихийные и во многом эмоциональные оценки соотношения «риск—польза» для ядерной энергетики способны, кажется, разрушить сейчас весь ядерно-энергетический комплекс страны. В какой-то степени эти оценки опираются и на бытующее мнение об исключительной опасности для человека Чернобыльских «горячих частиц». При этом, как часто бывает, происходит смешение понятий «опасный» и «необычный».

В этой статье предпринята попытка разобраться в том, что же представляют собой «горячие частицы» Чернобыльской аварии и чем они опасны для человека.

Чернобыльская авария

В 1 ч 24 мин 26 апреля 1986 г. на 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС произошла авария, негативные последствия которой не удалось ликвидировать до настоящего времени. В истории Чернобыльской катастрофы можно условно выделить два этапа.

Первый этап — период развития аварии, длившийся до конца мая 1986 г. В этот отрезок времени сформировалось первичное загрязнение пострадавших территорий нашей страны продуктами деления, выброшенными из разрушенного 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС.

Принцип работы ядерного реактора основан на использовании энергии, выделяющейся при делении ядер урана нейтронами. Данный процесс сопровождается образованием радиоактивных продуктов — осколочных радионуклидов. В эту группу радионуклидов входят более 200 радиоактивных изотопов, элементов из средней части периодической таблицы элементов Д.И. Менделеева (от цинка до гадолиния). При захвате нейтронов ядрами урана образуются изотопы трансурановых элементов. Эта группа радионуклидов состоит из более чем 10 изотопов из нижней части периодической таблицы — от урана до кюрия.

До конца мая 1986 г. радионуклидное загрязнение атмосферного воздуха над пострадавшими от Чернобыльской аварии территориями определялось прохождением воздушных масс, осуществлявших перенос на громадные расстояния продуктов деления, постоянно выбрасываемых из реактора в атмосферу. Хронология выброса такова [1,2,3,4]:

— 26.04.86: взрыв и механический выброс из разрушенной активной зоны 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС диспергированных топливных масс, радиоактивных паров и газов. В это время возник уникальный по своим свойствам Чернобыльский аэрозоль, в основном состоящий из частиц выгоревшего ядерного топлива. Частицы топлива являются микрокристаллами диоксида урана, который во время горения графита активной зоны мог окислиться до окиси-закиси. Кристаллическая решетка этих частиц (их топливная матрица) прочно удерживает осколочные и трансурановые радионуклиды, которые образовались в топливе за счет деления урана.

— 26.04.86—02.05.86: разогрев топлива, вызванный начальным ростом реактивности, энергией радиоактивного распада и горением графита. Ежедневный уровень выброса радионуклидов уменьшался в течение этой фазы, поскольку активную зону стремились изолировать от внешней среды с помощью создания насыпной подушки. В этот период в центральный зал разрушенного 4-го блока были заброшены с воздуха тысячи тонн песка, доломита, свинца, карбида бора. Увеличение температуры топливных масс до 1500—2500°C привело к постепенному испарению относительно летучих продуктов деления. Мелкодисперсные частицы топлива и летучие продукты деления продолжали в этот период поступать в атмосферу вместе с восходящими потоками разогретого воздуха и продуктов горения графита, просачивающихся через пористое тело подушки. К концу этого периода (через 6,5 дня после взрыва) вблизи ЧАЭС возросли концентрации ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{99}Mo , ^{103}Ru , ^{106}Ru .

— 03.05.86—05.05.86: резкий рост температуры топлива из-за ухудшения теплообмена, вызванного эффективным противодействием подушки газообмену между горящей графитовой кладкой активной зоны и атмосферой. Разогрев топливосодержащих масс привел к их частичному расплавлению, а также увеличению массы и давления парогазовой смеси, удерживаемой подушкой. Давление увеличивалось до тех пор, пока парогазовая смесь не стала прорываться через подушку, частично разрушив ее в нескольких местах. При этом большое количество продуктов деления, в том числе и в виде топливных частиц различных размеров, подвергшихся температурным изменениям (отжигу в условиях доступа кислорода), было вторично выброшено в атмосферу. В это время (через 8,5 дня после взрыва) в районе промплощадки ЧАЭС возросли концентрации ^{95}Zr и ^{141}Ce , ^{144}Ce — изотопов тугоплавких элементов, прочно связанных с топливной матрицей.

— 06.05.86—01.06.86: фаза стабилизации теплообмена топливосодержащих масс с окружающей средой и быстрого спада выброса радиоактивных веществ из разрушенного реактора. Процесс стабилизации сопровождался несколькими достаточно мощными выбросами смеси относительно летучих продуктов деления в атмосферу.

По оценкам экспертов на первом этапе развития аварии практически все накопленные в топливе активной зоны 4-го энергоблока инертные радиоактивные газы (ксенон и криптон) элиминировали из топлива и рассеялись в атмосфере. Приблизительно 10—20% менее летучих элементов (йод, теллур и цезий) и 3—6% тугоплавких материалов (радионуклиды Ba, Sr, Ce, Pu и др.) были также выброшены в атмосферу. Более 90% массы ядерного топлива осталось в помещениях разрушенного энергоблока. Это топливо было затем изолировано специальным укрытием — «Саркофагом», построенным над разрушенным блоком. Приблизительно 30% выброшенной в этот период активности выпало в пределах 50-километровой зоны вокруг ЧАЭС.

Второй этап в истории Чернобыльской катастрофы — период ликвидации последствий аварии,

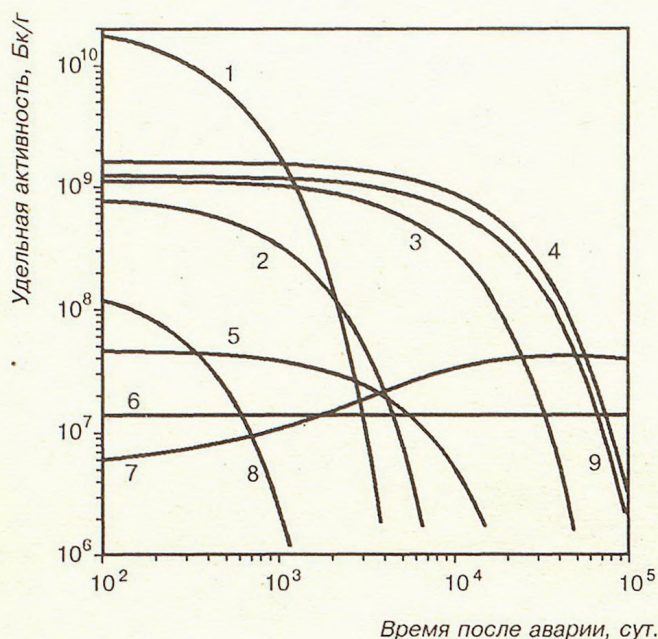


Рис. 1. Удельная активность радионуклидов в частицах топлива, образовавшихся 26.04.86.:

1 — ^{144}Ce ; 2 — ^{134}Cs ; 3 — ^{241}Pu ; 4 — ^{137}Cs ; 5 — ^{144}Eu ; 6 — $^{239+240}\text{Pu}$; 7 — $^{241}\text{Am} + ^{238}\text{Pu}$; 8 — ^{242}Cm ; 9 — ^{90}Sr .

который начался во второй половине мая 1986 г. и продолжается до настоящего времени. На этом этапе главную роль в загрязнении приземной атмосферы играло вторичное пылеобразование, обусловленное естественными процессами ветрового подъема и деятельностью людей на загрязненных территориях. В этот период влияние загрязнения подстилающей поверхности на радиоактивность приземного слоя воздуха имело, как правило, локальный характер.

Свойства Чернобыльских «горячих частиц»

Значительная масса радиоактивных веществ была выброшена из разрушенного реактора в виде мелких «горячих частиц» с высокой удельной активностью. Воздушные потоки перенесли эти частицы на многие сотни километров от места аварии, вынеся наиболее мелкие из них за пределы СССР. Исследования «горячих частиц», обнаруженных на воздушных фильтрах и в выпадениях, показали, что все частицы делятся на два больших класса [5].

К частицам 1-го типа предложено относить частицы сложного радионуклидного состава. Они содержат ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{95}Zr и ^{95}Nb примерно в равных пропорциях, небольшие количества ^{134}Cs , ^{137}Cs , а также радионуклиды ^{103}Ru и ^{106}Ru . В этих частицах вместе с продуктами деления были обнаружены и альфа-излучатели. Частицы этого типа образовались в результате диспергирования (дробления) топливосодержащих масс активной зоны 4-го энергоблока 26.04.86 и 03.—05.05.86. Все эти топливные частицы имеют сходный радионуклидный состав, мало отличающийся от усредненного на момент аварии изотопного состава топлива разрушенного реактора. Проведенные иссле-

Т а б л и ц а 1

Основные дозообразующие радионуклиды в топливных Чернобыльских частицах, Бк/г диоксида U-238

Радионуклид	Удельная активность*	Радионуклид	Удельная активность*
Sr — 89	1,8 + 10	Ce — 144	2,2 + 10
Sr — 90	1,2 + 9	Eu — 154	4,6 + 7
Zr — 95	3,0 + 10	Np — 239	1,1 + 11
Nb — 95	2,9 + 10	Pu — 241	1,1 + 9
Ru — 103	2,5 + 10	Pu — 238	4,3 + 6
Ru — 106	6,6 + 9	Pu — 239	4,7 + 6
Te — 132	1,1 + 10	Pu — 240	9,7 + 6
I — 131	1,3 + 10	Pu — 242	1,3 + 4
Cs — 134	8,4 + 8	Am — 241	8,3 + 5
Cs — 137	1,6 + 9	Cm — 242	1,9 + 8
Ba — 140	2,0 + 10	Cm — 244	9,6 + 5

Примечание. * Удельная активность радионуклидов в топливных частицах через 24 часа после разрушения реактора IV блока ЧАЭС.

Надпись 5.2E—01 означает $5,2 \cdot 10^{-1}$

дования показали, что в частицах диспергированного чернобыльского топлива осколочные и трансурановые радионуклиды прочно связаны с урановой матрицей. Специфическая связь этих радионуклидов с матрицей позволяет оценивать поступление топливных аэрозольных частиц в организм человека по активности одного из радионуклидных маркеров, которые в условиях Чернобыльской аварии присутствуют только в этих особых частицах. К числу таких маркеров относятся гамма-излучающие изотопы тугоплавких элементов — циркония, ниобия, церия, а также изотопы плутония и других альфа-излучателей. В основном два процесса определяют радионуклидный (изотопный) состав топлива: деление урана, сопровождающееся ростом количества осколочных радионуклидов, и радиоактивный распад этих радионуклидов. Оба эти процесса приводят к накоплению в топливе работающего реактора долгоживущих радионуклидов ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{90}Sr , ^{239}Pu , ^{144}Ce . С разрушением реактора прекратились протекавшая в нем цепная реакция деления и образование новых радионуклидов. Начиная с этого момента радионуклидный состав топлива стал определяться только процессами радиоактивного распада. Выпадение в результате аварии долгоживущих радионуклидов на поверхность земли будет источником опасности для людей на многие годы после аварии.

Принятые соотношения активностей основных дозообразующих радионуклидов в частице топливного аэрозоля приведены в табл.1 [6]. Благодаря радиоактивным превращениям, удельная активность радионуклидов в топливных частицах меняется, как показано на рис.1. Только удельная активность суммы $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$ в топливе (диоксиде урана-238) практически не зависит от времени после аварии и равна 14 МБк/г. По мере распада гамма-излучающего ^{144}Ce в качестве топливного маркера все чаще используются ^{239}Pu и ^{240}Pu .

Ко 2-му типу отнесены частицы, активность которых определяется одним-двумя относительно

летучими радионуклидами. В большинстве случаев — изотопами ^{103}Ru и ^{106}Ru . В некоторых случаях активность таких частиц определяли изотопы цезия, йода, теллура. Частицы 2-го типа в основном образовывались при конденсации на нерадиоактивных носителях радионуклидов, находящихся в облаке выброса в парогазовой фазе. Образование аэрозолей такого типа является частым явлением при испытаниях ядерного оружия, при переработке ядерного топлива или нормальной эксплуатации атомных электростанций. Поведение в организме человека радионуклидов, связанных с такими аэрозольными частицами, хорошо изучено.

Поведение «горячих частиц» в организме человека

Прочность связи осколочных радионуклидов с урановой матрицей проявилась в том, что в аэрозольных пробах с промплощадки ЧАЭС (июнь 1986 г.), в легких и покровных тканях погибших свидетелей аварии на ЧАЭС, а также в аэрозольных пробах из помещений «Укрытия» (1990—1991 гг.) были обнаружены труднорастворимые соединения изотопов йода и цезия, совершенно несвойственные этим элементам в обычных условиях.

Прочность связи радионуклидов с матрицей в топливных частицах исследовали с помощью диализа аэрозольной пробы в растворе Рингера. Поскольку все обычные соединения цезия хорошо растворимы, то при 2-суточном диализе через мембрану с диаметром пор около 0,5 мкм все 100% активности ^{137}Cs должны перейти в раствор. Тем не менее в пробах, отобранных на промплощадке Чернобыльской АЭС в июне 1986 г., около 40% цезия в аэрозоле находилось в труднорастворимой форме, очевидно, в составе частиц топлива, а остальная часть — в обычной растворимой форме. В 1990—1991 гг. в пробах из помещений «Саркофага» было обнаружено, что не менее 30% цезия по-прежнему находилось в составе топливных частиц.

Проведено специальное исследование кинетики диализа радионуклидов из проб, полученных в помещениях «Саркофага». Во всех пробах обнаружены маркеры топливных частиц. Соотношение между активностью гамма-излучающих продуктов деления и активностью ^{144}Ce на мазках статистически значимо не отличалось от этого соотношения в представительной топливной частице на момент измерения проб (июнь 1992 г.).

Диски диаметром 35 мм, приготовленные из участков фильтров, имеющих наибольшее поверхностное загрязнение, были зажаты между двумя мембранными фильтрами с диаметром пор около 0,5 мкм и помещены в термостатированные стаканы с раствором Рингера объемом 150 мл для проведения диализа. Выщелачивание радионуклидов из проб исследовали в течение 122 суток после начала диализа. Результаты анализа содержания ^{137}Cs и суммы альфа-излучателей в растворе были использованы для определения постоянной перехода радионуклидов из пробы в раствор. Обнаружено, что более 70% ^{137}Cs находится в пробе в слаборастворимой форме с постоянной выщелачивания $0,002 + 0,001$ 1/сут. Остальной цезий в 20 раз

более подвижен. Постоянная диализа суммы альфа-излучателей из проб равна $0,005 + 0,002$ 1/сут. Различие постоянных выщелачивания ^{137}Cs и суммы альфа-излучателей не является статистически достоверным ($p > 0,05$), что подтверждает предположение о том, что эти радионуклиды находятся в одинаковой физико-химической форме, являясь связанными топливной матрицей. По обобщенным данным о переходе в раствор Ru и Cs постоянная выщелачивания радионуклидов из топливных частиц оценивается величиной $0,003 + 0,002$ 1/сут.

Очевидно, что в эксперименте *in vitro* невозможно смоделировать все процессы взаимодействия аэрозольных частиц с внутрилегочной средой, однако полученные результаты подтверждают гипотезу о равнопрочной связи между урановой матрицей и различными по природе радиоактивными продуктами деления. Это заставило нас разработать специальную модель для описания поведения радионуклидов «горячих» топливных частиц в органах дыхания человека.

Поведение в органах дыхания радионуклида, находящегося в аэрозольных частицах, обусловлено двумя факторами: дисперсностью частиц, влияющей на количество активности, осажденной в различных отделах органов дыхания, и транспортабельностью вдыхаемых соединений радионуклида, определяющей скорость прохождения радионуклида через барьер «воздух — легочный интерстиций — внутренняя среда организма (кровь)». Распределение активности аэрозоля по диаметру частиц в большинстве случаев описывается логнормальным распределением с двумя параметрами — аэродинамическим медианным по активности диаметром (АМАД) и стандартным геометрическим отклонением, величина которого принята в данной работе равной 2,5. Величина второго фактора ранжируется согласно трем ингаляционным классам, рекомендованным Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) [7]. К классу Д (класс «дневников») рекомендовано относить соединения радионуклидов, которые проникают из легких в кровь с биологическим полупериодом менее 10 сут. К классу Г (класс «годовиков») — соединения, обладающие биологическим полупериодом выведения из легких, превышающим 100 сут. Остальные соединения относятся к классу Н (класс «недельников»). Для правильной оценки доз внутреннего облучения от смеси радионуклидов, находящихся в воздухе (например, при прохождении облака ядерного взрыва), необходимо определить для каждого радионуклида принадлежность его химического состояния в аэрозоле к определенному ингаляционному классу Д, Н или Г, а также дисперсные характеристики этого аэрозоля. При этом информация, полученная о свойствах любого радионуклида, бесполезна для других компонентов смеси, поскольку радионуклиды в такой смеси, как правило, независимы и могут находиться в разных частицах.

Связанные матрицей радионуклиды топливных частиц при попадании в организм человека проявляют черты коллективного поведения только в барьерных органах — органах дыхания, желудочно-кишечного тракта и коже, где связи, удерживающие

вместе радионуклиды, разрушаются после происходящей в этих органах химической деструкции топливной матрицы. Химическая деструкция аэрозольных частиц в барьерных органах является основным процессом, приводящим к проникновению радионуклидов в кровь, после чего они ведут себя независимо.

По аналогии с диоксидом и окисью-закисью урана, которые по показателю транспортабельности в органах дыхания отнесены МКРЗ к классу Г при ингаляции, к тому же классу следует отнести и все радионуклиды, поступающие в органы дыхания связанными топливной матрицей.

Таким образом, можно предложить следующую модель поведения в организме радионуклидов, связанных топливной матрицей.

1. Под влиянием топливной матрицы поведение радионуклидов топливных частиц в барьерных органах носит коллективный характер. Радионуклиды топливных частиц могут поступать в кровь только после химической деструкции топливной частицы.

2. Находящиеся в составе топливных частиц радионуклиды ведут себя в барьерных органах подобно оксидам урана: при ингаляционном поступлении они ведут себя в легких как элементы, находящиеся в соединениях, относящихся к ингаляционному классу Г; величина коэффициента всасывания в желудочно-кишечном тракте для всех радионуклидов в составе топливных частиц не превышает величины 0,002, рекомендованной для оксидов урана [7].

3. Распределение и удержание во внутренних органах радионуклидов, поступивших в кровь после деструкции топливных частиц, носит индивидуальный характер и определяется только химическими свойствами этих радионуклидов.

Находящиеся в топливных частицах радионуклиды приобретают несвойственные им в обычных условиях свойства оксидов урана. Например, биокинетика ^{137}Cs после его ингаляционного поступления в составе аэрозольных топливных частиц оказывается

зависимой от дисперсности аэрозоля, хотя обычные соединения этого нуклида по классификации МКРЗ отнесены к ингаляционному классу Д, практически не задерживаются в легких и влияние дисперсности аэрозолей на кинетику этих соединений ^{137}Cs в теле отсутствует. На рис. 2 представлена зависимость величины $T_{\text{эф}}(^{137}\text{Cs})$ — эффективного периода полувыведения ^{137}Cs из тела условного взрослого человека, от величины АМАД частиц топлива. Расчеты выполнены с помощью программы «R—MAN», созданной в Лаборатории внутренней дозиметрии Института биофизики МЗ РФ [8]. По мере роста АМАД аэрозоля от 1,0 до 50,0 мкм величина $T_{\text{эф}}(^{137}\text{Cs})$ уменьшается с 500—600 до 130 суток. С увеличением размера частиц аэрозоля изменяется вклад отдельных процессов выведения топливных частиц из органов дыхания в общий процесс удержания радионуклидов (в частности, ^{137}Cs) в теле человека. В случае ингаляции аэрозоля с АМАД около 1 мкм основная масса топливных частиц осаждается в легочной области органов дыхания и заключенные в них радионуклиды попадают в кровь через коммуникации легочного отдела органов дыхания, в которых происходит длительная задержка радиоактивного вещества, обусловленная деструкцией частиц. По мере увеличения размера частиц топлива растет вероятность их осаждения в носоглотке и трахеобронхиальном отделе органов дыхания, при этом некоторая часть радионуклидов практически без задержки поступает в кровь, а основная масса радиоактивного вещества транзитом проходит через желудочно-кишечный тракт и выводится из организма. В этом случае доля длительно удерживаемой в легких активности мала и период полувыведения ^{137}Cs из тела оказывается близким к 110 сут. — периоду полувыведения цезия при его поступлении с пищей.

Распределение радиоактивного вещества в теле человека также зависит от химического состава и дисперсности вдыхаемых аэрозольных частиц. Влиянию последнего фактора исследователи уделяют незаслуженно мало внимания. Отношение содержания радионуклида в легких к содержанию во всех других органах тела, которое мы обозначим через R , служит критерием для оценки транспортабельности в органах дыхания радионуклидов в ингалированном аэрозоле и их физико-химических свойств. Считается, что в ранние сроки после ингаляции аэрозолей величины R много больше 1 указывают на поступление радионуклида в составе соединений, относящихся к ингаляционному классу Г, а величины R значительно меньшие 1 — на поступление соединений радионуклидов, относящихся к классам Н или Д. Однако зависимость отношения R от дисперсности аэрозоля настолько сильна, что при ингаляции грубо-дисперсных аэрозолей веществ, относящихся к классу Г, его величина может оказаться равной значению, ожидаемому при ингаляции мелко-дисперсных аэрозолей, относящихся к ингаляционному классу Н. Это явление иллюстрирует рис. 3, на котором приведены зависимости отношения R от АМАД аэрозоля через 30—60 суток после поступления ^{239}Pu в составе топливных частиц

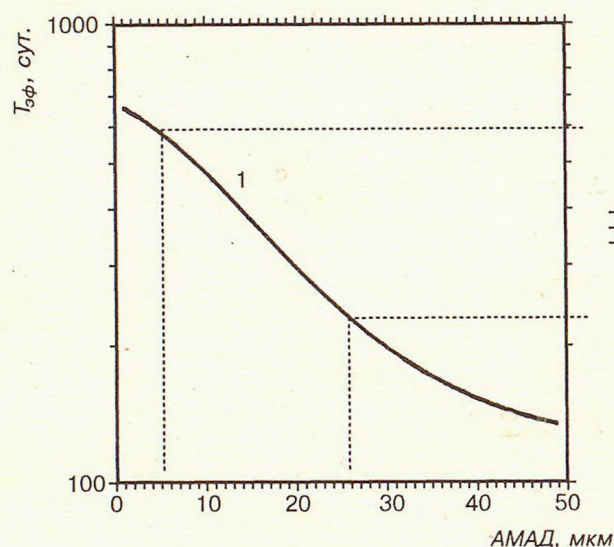


Рис. 2. Зависимость $T_{\text{эф}}(^{137}\text{Cs})$ от АМАД топливных частиц:

1 — $T_{\text{эф}}(^{137}\text{Cs})$ как функция АМАД;
* — $T_{\text{эф}}(^{137}\text{Cs})$ у свидетелей аварии по данным СИЧ-а.

и соединений, относящихся к классу Н. Эти зависимости показывают, что заключение о принадлежности поступивших в организм соединений Р_и к тому или иному ингаляционному классу не может быть однозначным в широкой области значений величины R.

Коллективный характер поведения в барьерных органах, связанных топливной матрицей радионуклидов, делает возможным использование для оценки аэродисперсных характеристик ингалированного аэрозоля информации о поведении в системе «органы дыхания — остальные органы тела» любого из топливных радионуклидов, поскольку все радионуклиды находятся в одних и тех же частицах. Это свойство является главной особенностью, отличающей аэрозоль топливных частиц от простой смеси аэрозольных частиц, несущих различные радионуклиды.

«Горячие частицы» в организме свидетелей Чернобыльской аварии

На первом этапе аварии число людей, вовлеченных в работы на промплощадке ЧАЭС, было относительно невелико. По-видимому, это несколько тысяч человек — в основном персонал ЧАЭС и военнослужащие Советской армии, осуществлявшие охрану станции, дозиметрическую разведку и неотложные аварийно-восстановительные работы. Радиационная обстановка и характер выполняемых в этот период работ заставляют нас предположить, что именно в этот период следует ожидать наибольших доз облучения у отдельных участников ликвидации последствий аварии (ЛПА).

Основная масса участников ликвидации последствий аварии работала на станции в период с мая по ноябрь 1986 г. (сооружение и сдача в эксплуатацию «Саркофага», запуск 1-го и 2-го энергоблоков ЧАЭС и запуск 3-го энергоблока). Начиная с 1988 г. интенсивность строительно-

Т а б л и ц а 2
Общая численность и структура данных Российского государственного медико-дозиметрического регистра по Российской Федерации, Украине и Беларуси [9]

Категория лиц	Россия, % (137 591 чел.)	Украина, % (275 241 чел.)	Беларусь, % (174 507 чел.)
Ликвидаторы	70,4	36,6	10,8
Эвакуированные	2,0	18,9	7,1
Проживающие	25,7	43,8	81,2
Дети от 1 — 3 лет	1,9	0,8	0,9

восстановительных работ на промплощадке ЧАЭС пошла на убыль.

Одной из наиболее острых проблем ЛПА на ЧАЭС для России является проблема ликвидаторов и в первую очередь — проблема восстановления доз облучения этой наиболее пострадавшей от Чернобыльской аварии категории населения России. В течение всего периода ликвидации последствий аварии на ЧАЭС практически отсутствовал контроль внутреннего облучения. В настоящее время необходима ретроспективная оценка доз облучения участников ЛПА. Восстановление доз проводится для получения устойчивых вероятностных оценок индивидуальных поглощенных доз с целью обобщения опыта ликвидации последствий аварии в ее радиационно-дозиметрических аспектах, для планирования медицинской помощи гражданам России, наиболее пострадавшим от аварии на ЧАЭС. О масштабах этой проблемы позволяют судить сводные данные Российского государственного медико-дозиметрического регистра, приведенные в табл.2.

Для оценки общего числа участников ЛПА из России к общему числу участников ЛПА, зарегистрированных в РГМДР, следует прибавить еще 38165 человек из регистра Минатома, 12 107 — МВД и 11860 — МО [9]. Таким образом, общее число участников ЛПА, для которых нужно верифицировать дозы, примерно 159000 человек.

К сожалению, среди участников ликвидации последствий Чернобыльской аварии нет группы лиц, для которой в полном объеме осуществлялся контроль доз излучения от суммы всех действующих источников внутреннего и внешнего излучения. Для всех групп участников ЛПА, хотя и в разном объеме, необходимо ретроспективное восстановление доз излучения от нескольких действовавших факторов. Категорией лиц, для которых имеется наиболее полный объем информации, пригодной для этой работы, являются работники Чернобыльской АЭС — свидетели аварии. Эта группа была выбрана в качестве контрольной группы для отработки методов ретроспективного восстановления доз внутреннего излучения. По результатам ретроспективного восстановления доз для этой группы можно судить о дозах облучения и участников ликвидации последствий аварии.

Профессионалами — свидетелями аварии, называем работниками Чернобыльской АЭС и пожарных, работавших на промплощадке и в помещениях ЧАЭС 26—27 апреля 1986 г. Эти

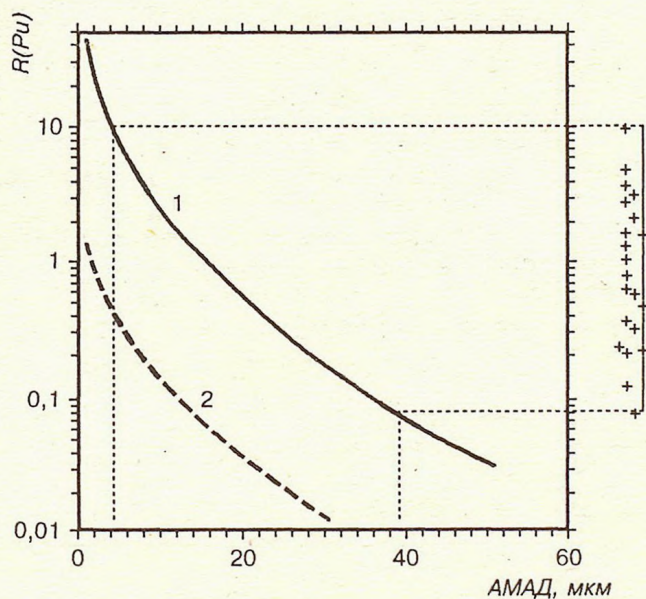


Рис. 3. Величина $R(Pu)$ в зависимости от АМАД частиц:

- 1 — через 30—90 суток после однократного поступления топливного Р_и;
- 2 — через 30 суток после однократного поступления аэрозоля Р_и класса "Н";
- 3 — для погибших свидетелей аварии на ЧАЭС.

люди являются профессиональными работниками, проходившими обязательный медицинский отбор при приеме на работу, а в процессе работы — периодический контроль состояния здоровья. Они образуют относительно однородную по полу (все обследованные — мужчины) и физическому развитию группу практически здоровых лиц с параметрами (среднее значение $\pm$ стандартное отклонение, в скобках — диапазон изменения параметра): возраст 48 ± 9 лет (27—65 лет); рост 172 ± 7 см (150—192 см); масса 76 ± 10 кг (55—100 кг). Эта однородная группа близка по своим параметрам к условному взрослому работнику [10]. Биокинетику радионуклидов в организме этих людей будут хорошо описывать модели, предложенные для условного человека. Наблюдаемые в этом случае отклонения от стандартной картины поведения радионуклидов в организме свидетелей аварии будут, по-видимому, определяться действием экзогенных факторов. Влиянием эндогенных факторов, определяющих вариативность биокинетики радионуклидов в организме отдельных индивидуумов, при анализе данных, относящихся к этой группе свидетелей аварии, пренебрегаем.

Главными экзогенными факторами, определяющими биокинетику радионуклидов, являются дисперсность аэрозоля топливных частиц и явление связывания радионуклидов матрицей этих частиц.

В 1986—1988 гг. сотрудниками Института биофизики Минздрава России и Управления дозиметрического контроля ПО «Комбинат» (г.Чернобыль) были получены оценки прижизненного и посмертного содержания гамма- и альфа-излучающих продуктов деления в теле рассматриваемой группы свидетелей Чернобыльской аварии.

Цезий в теле свидетелей аварии из числа персонала ЧАЭС

Из числа работников ЧАЭС, принимавших участие в работах 26—27 апреля 1986 г. и прошедших обследование на СИЧ-е, отобрали первую контрольную группу свидетелей аварии из 264 носителей топливных частиц, обследованных на СИЧ-е не менее трех раз в период с 16.05.86 по 16.11.86. Из этой группы были отобраны несколько десятков лиц, содержание ^{137}Cs в организме которых и спустя 700—800 суток после аварии все еще превышало 100 нКи — величину среднего для 1987—1988 гг. содержания ^{137}Cs у работников ЧАЭС, не принимавших участия в работах апреля—мая 1986 г. На рис.4 представлены индивидуальные кривые выведения ^{137}Cs для нескольких свидетелей аварии. Период полувыведения ^{137}Cs из организма этих лиц лежал в пределах от 230 до 600 суток, что полностью соответствует предсказаниям модели.

Из этой группы для дальнейшего анализа были отобраны результаты обследования 15 человек, у которых, согласно их профмаршрутам, с наибольшей вероятностью можно было ожидать однократного ингаляционного поступления аэрозоля топливных частиц в первые дни аварии. Эти данные были

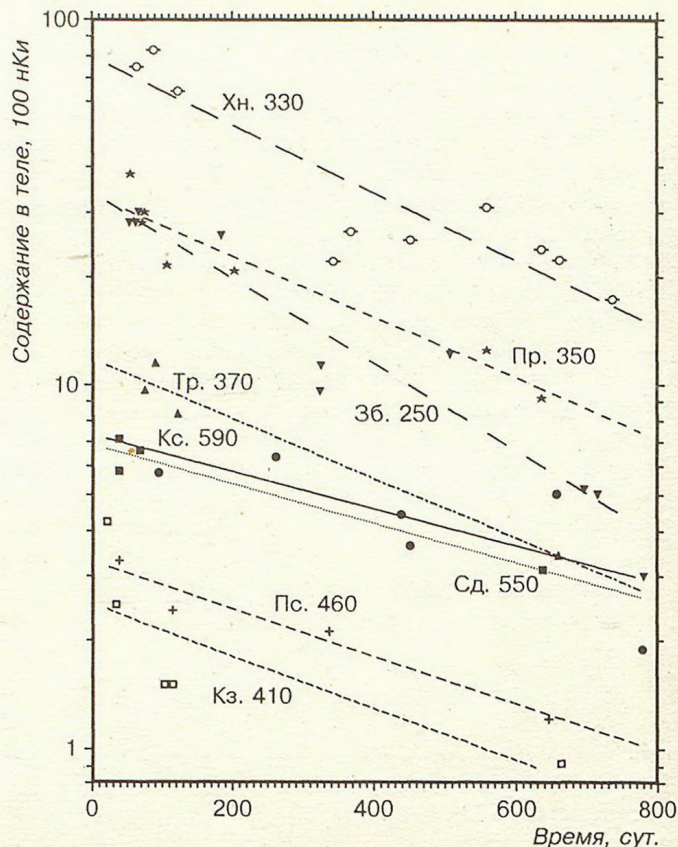


Рис. 4. Индивидуальные кривые выведения ^{137}Cs . Знаки кривых — код свидетеля и оценка $T_{\text{эф}}$, сут.

нормализованы. За единицу для каждого обследованного принято содержание радионуклида в теле, полученное по индивидуальной кривой выведения ^{137}Cs путем экстраполяции результатов более поздних измерений к дате аварии. Нормализованные данные удовлетворительно описывает экспоненциальная кривая с периодом полувыведения, равным 330 сут. Эта величина в три раза превосходит рекомендованное МКРЗ [7] для описания кинетики выведения цезия из организма условного взрослого человека значение. Зависимость $T_{\text{эф}}$ (^{137}Cs) от величины АМАД топливного аэрозоля была представлена на рис.2. Согласно модели полученная оценка в 330 сут. для величины эффективного полупериода выведения ^{137}Cs из тела соответствует поведению ^{137}Cs в организме взрослого условного человека после однократной ингаляции аэрозоля топливных частиц с АМАД 16 ± 2 мкм. Флюктуаций величины $T_{\text{эф}}$ (^{137}Cs) в однородной популяции, в качестве которой рассматриваем персонал ЧАЭС, свидетельствуют о том, что в организм свидетелей аварии на ЧАЭС, работавших на промплощадке ЧАЭС 26—28 апреля 1986 г., воздействовали топливные частицы с АМАД в диапазоне от 5 до 25 мкм.

Плутоний в теле свидетелей аварии из числа персонала ЧАЭС

Работники ЧАЭС, умершие в клинике от острой лучевой болезни в 1986 г., составляют вторую

контрольную группу свидетелей аварии на ЧАЭС. Результаты посмертного исследования распределения радионуклидов в органах этой группы свидетелей составляют другой массив данных, пригодных для верификации модели. На рис.3 приведены оценки величины R (^{239}Pu) для Pu , поступающего в организм в составе аэрозольных частиц топлива различной дисперсности. По данным В.И.Попова, величина R (^{239}Pu) для свидетелей аварии на ЧАЭС, погибших от острой лучевой болезни в течение 90 сут. после аварии, лежала в пределах от 0,07 до 10,0 [11]. Это соответствует ингаляционному поступлению плутония в топливных частицах с АМАД от 4 до 40 мкм. Предположение авторов работы [11] от том, что плутоний поступал в организм погибших свидетелей Чернобыльской аварии в виде соединений, принадлежащих при ингаляции к классу Н, является, по-видимому, ошибочным. Согласно нашим оценкам, приведенным на рис.3, величина R для таких соединений никогда не превышает единицы. Оценив, по данным [11], величину R (Pu) для погибших свидетелей аварии ее средним значением равным 1,6, с помощью модели определили ожидаемые значения АМАД топливных частиц. Оказалось, что эти оценки хорошо совпадают с оценками АМАД, сделанными по прижизненному поведению ^{137}Cs в организме свидетелей аварии. Оценки по R (Pu) среднего значения АМАД топливных частиц равны 12 ± 2 мкм.

П о с т у п л е н и е т о п л и в н ы х ч а с т и ц в о р г а н и з м с в и д е т е л е й а в а р и и

Общая численность персонала, принимавшего участие в работах на территории станции 26—27 апреля 1986 г., по оценкам ЧАЭС не превышала 1500 человек, из которых 918 прошли обследование на СИЧ-е Управления дозиметрического контроля ПО «Комбинат» (г.Чернобыль). В теле 614 из них были обнаружены гамма-излучающие маркеры топливных частиц (^{95}Zr , ^{95}Nb). Согласно этим данным и оценкам, полученным по двум контрольным группам свидетелей аварии, не менее 67% работников станции, явившихся свидетелями аварии на ЧАЭС, подверглись воздействию аэрозоля чернобыльских топливных частиц с различной дисперсностью. Мы говорим именно аэрозолей потому, что в условиях неоднородного загрязнения помещений ЧАЭС следует говорить не об одном «среднем» аэрозоле, а о том, что в зависимости от помещения и выполняемой работы отдельные группы людей оказывались в различных «аэрозольных облаках», имеющих сходный радионуклидный состав топливных и конденсационных аэрозолей, но различающихся по их дисперсности. Диапазон изменения величин АМАД топливных частиц, оцененным для живых свидетелей аварии по величине Тэф (^{137}Cs) — от 5 до 25 мкм, хорошо согласуется с оценкой этого диапазона по величине R (Pu), полученной для погибших свидетелей — 4—40 мкм. Совпадают и оценки медианных значений АМАД, полученных для этих двух групп

свидетелей аварии, что подтверждает корректность предложенной модели биокинетики радионуклидов, связанных в топливных чернобыльских частицах.

Ограниченность данных по профмаршрутам вынуждает использовать среднюю характеристику дисперсного состава топливных частиц — величину АМАД, равную 15 мкм, при восстановлении поступления топливных частиц и доз внутреннего облучения свидетелей аварии. Согласно таким оценкам, величина поступления топливных частиц в организм контрольной группы свидетелей аварии лежала в диапазоне от 0,3 до 28 мкКи ^{144}Ce (7—670 Бк $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$) при средней величине поступления, равной 9 мкКи ^{144}Ce (210 Бк $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$).

Проблема Чернобыльских «горячих частиц»

Ингаляционное поступление топливных «горячих частиц» не является единственным радиационным фактором Чернобыльской аварии. Его воздействие на людей происходило на фоне ингаляционного поступления аэрозолей конденсации, внешнего облучения тела облаком выброса и загрязненной поверхностью земли, облучения щитовидной железы инкорпорированными изотопами йода. Тем не менее именно поступление топливных частиц в значительной степени определяет для участников ЛПА дозы внутреннего излучения в основных (кроме щитовидной железы) органах.

Органы дыхания человека являются совершенным воздушным фильтром, защищающим организм от проникновения разной пыли, находящейся в приземной атмосфере. Их фильтрующая способность такова, что практически в любых условиях запыленности воздуха средний аэродинамический диаметр частиц, которые задерживаются в легких человека, не превышает 1—2 мкм. Время, в течение которого такие частицы могут удерживаться в легких, зависит от их химических свойств. Для частиц, состоящих из веществ, относящихся к классу нетранспортабельных в легких, среднее время задержки в альвеолярной части легких достигает двух лет. Крупные частицы не проникают дальше носоглотки и как правило заглатываются, попадая при этом в желудочно-кишечный тракт. Перемещаясь с пищей или слюной, эти частицы примерно сутки способны облучать стенки желудка и кишечника, а затем выводятся из организма. Для таких частиц критическим, наиболее поражаемым, органом могут стать стенки нижнего отдела толстого кишечника, через который содержимое продвигается с наименьшей скоростью.

Аэродинамический диаметр (АД) частицы численно равен среднему геометрическому диаметру, умноженному на корень квадратный из плотности частицы, выраженной в единицах г/см^3 , и при плотности диоксида урана 10 г/см^3 геометрический размер топливной частицы с АД 1 мкм равен примерно 0,3 мкм. Частицы вовсе не этих малых размеров имеют в виду, когда судят об опасности Чернобыльских «горячих частиц»: бытующее мнение о громадной разрушительной силе этих частиц основано на ложной посылке о том, что в легкие могут попадать видимые под микроскопом в пробах

почвы «горячие частицы» с геометрическими размерами несколько сот микрон.

Уровни доз внутреннего облучения, ожидаемые от поступления топливных частиц, различны, но, как правило, меньше тех уровней, которые могут вызвать острые нестохастические эффекты, поэтому биологическое действие таких частиц будет проявляться в увеличении вероятности стохастических эффектов действия радиации, т.е. увеличении частоты раковых заболеваний (в первую очередь органов дыхания, кроветворения и скелета).

Специалисты расходятся в оценке опасности «горячих частиц». До настоящего времени остается открытым вопрос о том, как соотносятся риски образования опухолей легких под действием нерастворимых аэрозольных частиц, образующих в легких локальные источники излучения — «горячие частицы», и растворимых соединений тех же радионуклидов, равномерно облучающих легочную ткань. Нет однозначного ответа на этот вопрос и в рекомендациях 31 Публикации МКРЗ [12], посвященной биологическим эффектам ингаляционных радионуклидов.

В практике современной радиационной гигиены при определении допустимых уровней для источников внутреннего облучения рассматривается только средняя по органу или ткани величина поглощенной дозы излучения. Ни на микроскопическом, ни на макроскопическом уровне неравномерность облучения органа или ткани, как правило, при этом не учитывается.

Подобный подход был применен для оценки воздействия чернобыльского аэрозоля на выделенную нами группу свидетелей аварии. Для восстановления доз внутреннего облучения была разработана специальная методика, основанная на описанной ранее дозиметрической модели [6,13,13а]. Эта методика позволяет оценить поступление топливных частиц по содержанию в теле гамма-излучающих реперов топливной матрицы.

Опираясь на данные прямых измерений А.А.Молоканова, полученных в мае—июне 1986 г. на промплощадке ЧАЭС [11], при восстановлении доз предполагали, что конденсационные аэрозоли, содержащие ^{131}I , ^{103}Ru , ^{106}Ru , имели АМАД 1 мкм, содержащие ^{134}Cs , ^{137}Cs — 5 мкм. АМАД топливного аэрозоля принят равным 15 мкм — оценке ожидаемого размера этих частиц, полученной в результате представленного выше анализа данных посмертных и прижизненных измерений содержания радиоактивных веществ в теле свидетелей аварии на ЧАЭС.

Радионуклиды, поступающие в организм вместе с частицами конденсационного аэрозоля, одновременно поступают и в составе топливных частиц. Так как дозиметрические характеристики радионуклидов меняются в зависимости от того, в составе каких частиц они поступают, то оценка поступления в органы дыхания относительно летучих радионуклидов в составе топливных и конденсационных аэрозолей является важным пунктом методики.

Результаты восстановления доз внутреннего облучения свидетелей Чернобыльской аварии

Т а б л и ц а 3

Основные результаты восстановления доз внутреннего облучения свидетелей аварии на ЧАЭС

Показатель	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум
Ингаляционное поступление аэрозолей, мКи				
Топливный аэрозоль				
Ce — 144	8,8	7,3	0,3	27,5
Конденсационный аэрозоль				
I — 131	9,8	8,3	0,3	57,3
Ru — 103	8,6	7,4	0,05	49,4
Ru — 106	2,6	2,2	0,02	14,8
Cs — 137	0,6	0,5	0,005	3,4
Cs — 134	0,3	0,3	0,003	1,7
Дозы внутреннего облучения, сЗв				
Эквивалентная доза				
Костные поверхности	14,4	11,9	0,5	44,8
Легкие	12,2	10,7	1,5	48,0
НТК (ЖКТ)	11,8	9,7	0,9	35,9
Щитовидная железа	8,5	7,3	0,5	49,1
ВТК (ЖКТ)	4,7	3,9	0,3	14,4
Печень	2,9	2,4	0,2	9,0
Красный костный мозг	1,9	1,6	0,1	5,8
Эффективная доза	4,0	3,4	0,6	11,7

приведены в табл.3. Полученные результаты показали, что дозы облучения легких хорошо коррелируют с поступлением изотопов рутения в составе конденсационных частиц, а дозы облучения щитовидной железы — с поступлением ^{131}I в таких же частицах; дозы облучения остальных органов в основном определяются поступлением аэрозоля топливных частиц.

Проблема опасности «горячих» чернобыльских частиц не выходит за рамки общей проблемы оценки роли микроскопической неоднородности поля излучения инкорпорированных радионуклидов в радиационном канцерогенезе. Проблема «горячих частиц» стоит в одном ряду с проблемой прогноза риска от действия таких часто встречающихся в условиях профессионального облучения источников внутреннего облучения, как аэрозоли труднорастворимых соединений альфа-излучающих радионуклидов, например диоксида плутония.

Уникальность воздействия на органы дыхания частиц топливного аэрозоля заключается в том, что в легких эти частицы образуют микроскопические локальные источники излучения, испускающие одновременно альфа- и бета-частицы. Из-за плохой растворимости оксидов урана, образующих топливную матрицу, эти источники в течение долгого времени остаются фиксированными в определенных участках легочной ткани, постоянно облучая одни и те же значительные объемы легкого.

В работах зарубежных и отечественных ученых (31 Публикация МКРЗ, 1980) показано, что при ингаляционном воздействии на органы дыхания нетранспортабельных соединений альфа-излучающих радионуклидов (в основном изотопов плутония) коэффициенты риска образования опухолей

варьируют в широких пределах. В области малых доз отношение рисков образования опухолей под действием нерастворимых (образующих в легких локальные источники излучения) и растворимых соединений (равномерно облучающих легкие) колеблется от 0,1 до 10,0. Использование микродозиметрических подходов позволило нам в 1986 г. показать, что это является закономерным следствием модифицирующего действия микро-распределения альфа-излучающих «горячих частиц» в легочной ткани.

Данные 31 Публикации МКРЗ об оценках риска для чистых бета-излучателей позволяют предположить наличие аналогичных модифицирующих эффектов и для трудно растворимых бета-излучающих аэрозольных частиц.

Данные о рисках образования опухолей легких под действием микроскопических источников, испускающих и альфа- и бета-частицы противоречивы. Микродозиметрические оценки дают основания ожидать в таком случае синергических эффектов, обусловленных воздействием на чувствительные микроструктуры легочной ткани скоррелированных треков плотно- и слабо-ионизирующих частиц.

З а к л ю ч е н и е

Решение проблемы оценки опасности Чернобыльских «горячих частиц» может во многом изменить наши представления о нормировании загрязнения воздуха радиоактивными аэрозолями. К сожалению, работы в этом направлении только-только разворачиваются, и время безвозвратно уходит. Для успешного решения проблемы необходимо выполнить большой объем экспериментальных работ с натуральными и искусственными топливными частицами.

В числе первоочередных задач настоящего этапа исследования чернобыльских «горячих частиц» стоят следующие.

Во-первых, исследование свойств топливных «горячих частиц» в радиобиологическом эксперименте, которое преследует две цели: определение параметров кинетики радионуклидов из топливных частиц в барьерных органах человека и определение величины риска образования опухолей легких, костных поверхностей или поражения костного мозга при поступлении этих частиц в организм человека.

Во-вторых, построение биофизической модели (теории) образования опухолей легких под действием «горячих частиц» Чернобыльской аварии, использующей микродозиметрические концепции для описания радиационного поля инкорпорированных в легкие источников излучения, необходимое для корректного переноса результатов эксперимента с лабораторных животных на человека, также для экстраполяции оценок риска в область малых доз. Эта модель должна обеспечить также и оценки

риска для ингаляционного поступления в организм топливных частиц с различным радионуклидным составом, дисперсностью, удельной активностью и т.д. Разработка такой теории позволит выйти за ограниченные рамки экспериментального исследования и получить необходимые для практики оценки риска для широкого спектра условий воздействия аэрозольных топливных частиц на людей в условиях Чернобыльской аварии.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Чернобыль. Пять трудных лет: Сборник материалов о работах по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в 1986—1990 гг. / Под ред. Ю.И.Свинцева, В.А.Качалова.— М., 1992.
2. Израэль Ю.А., Петров В.Н., Авдюшин С.И. и др. Радиоактивное загрязнение природных сред в зоне аварии на Чернобыльской АЭС // Метеорол. и гидрол.— 1987.— N 2.— С.5—18.
3. Авария на Чернобыльской АЭС и ее последствия. Информация, подготовленная для совещания экспертов МАГАТЭ. Ч.2.— Приложение 4.— М., 1986.
4. Израэль Ю.А., Соколовский В.Г., Соколов В.Е. и др. Экологические последствия радиоактивного загрязнения природных сред в районе аварии Чернобыльской АЭС // Атомная энергия.— 1988.— Т.64, N 1.— С.28—40.
5. The Radiobiological Impact of Hot Beta-Particles from the Chernobyl Fallout: Risk Assessment.— Working Material of Research Co-ordination Meeting within the IAEA Co-ordinated Research Program.— Vienna, 1992.
6. Kutkov V.A., Murav'ev Yu.B., Aref'eva Z.S., Sokolova S.I., Semenova L.U. Internal Doses of Chernobyl Accident Witnesses Including Doses from Nuclear Fuel Particles // Umweltradioaktivitat, Radioökologie, Strahlenwirkungen / Hrsg. M.Winter, A.Wicke.— Köln: Verlag TUU Rheinland, 1993.— S.816—820.
7. Пределы поступления радионуклидов для работающих с ионизирующим излучением: Публ. 30 МКРЗ. Ч.1.— М.: Энергоиздат, 1982.
8. Murav'ev Yu.B., Kutkov V.A. R—MAN — a Computer Code for Internal Dose Evaluation and the Handbook «Dose Conversion Factors for Inhalation and Ingestion for Persons of Different Ages // Nuclear Energy and Human Safety: Book of Abstracts of 4-th Annual Scientific and Technical Conference of the Nuclear Society.— Nizhni Novgorod, 1993.— P.250—252.
9. Материалы Российского государственного медико-дозиметрического регистра // Радиация и риск.— М.: Обнинск, 1992.— Вып.1.— С.67—131.
10. Christy M., Eckerman K.E. Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources (ORNL/TM — 8381, Vol.1) — Oak Ridge, 1987.
11. Попов В.Н., Кочетков О.А., Молоканов А.А., Абрамов Ю.В., Ланна Л.Г. Формирование доз облучения от внутреннего облучения для персонала Чернобыльской АЭС и командированных в 1986—1987 гг. // Мед. радиол.— 1991.— N 2.— С.33—41.
12. ICRP Publication 31. Biological Effects of Inhaled Radionuclides // Ann. ICRP.— 1980.— Vol.4, N 1—2.
13. Kutkov V.A. Chernobyl Fuel Hot Particles in Man. // International Symposium: «Radioecology: Chemical Speciation — Hot Particles — CEC, IUR, SCzR»: Proceedings.— Znojmo, 1992.— P.6.
- 13a. Kutkov V.A., Murav'ev Yu.B. The Internal Dosimetry of Chernobyl Fuel Hot Particles // Nuclear Energy and Human Safety: Book of Abstracts of 4-th Annual Scientific and Technical Conference of the Nuclear Society.— Nizhni Novgorod, 1993.— P.247—249.

Поступила 23.11.93.