

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПАТОЛОГИИ,  
ОНКОЛОГИИ И РАДИОБИОЛОГИИ им. Р.Е.КАВЕЦКОГО

На правах рукописи

БОНДАРЕНКО ОЛЕГ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**РЕТРОСПЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ГОРЯЧИХ  
ЧАСТИЦ ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧАЭС И ДОЗИМЕТРИЧЕСКОЕ  
СОПРОВОЖДЕНИЕ РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

(03.00.01 радиобиология)

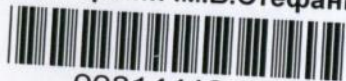
АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой

кандидата биологических наук

Киев - 1992

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00814413 (L)

Работа выполнена в Украинском научном центре радиационной медицины МЗ и АН Украины.

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор, руководитель отдела дозиметрии и радиационной гигиены УНЦРМ МЗ и АН Украины **ЛИХТАРЕВ И.А.**  
кандидат технических наук, руководитель лаборатории косвенных и расчетных методов дозиметрии УНЦРМ МЗ и АН Украины **РЕПИН В.С.**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института ядерных исследований АН Украины **МЕЛЕНЕВСКИЙ А.Э.**;  
доктор биологических наук, профессор, зав. кафедрой радиобиологии Украинской сельскохозяйственной академии, чл.-корр. АН Украины **ГУДКОВ И.Н.**

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии Академии аграрных наук Украины.

Защита состоится "26" ноября 1992 г. в 1330 часов на заседании специализированного совета Д016.38.02 в Институте экспериментальной патологии, онкологии и радиобиологии им. Р.Е.Кавецкого АН Украины (252022, Киев-22, ул. Васильковская, 45).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЭПОР.

Автореферат разослан "24" октября 1992 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета, к.м.н. \_\_\_\_\_



## Актуальность проблемы

Высоко радиоактивные аэрозольные частицы, называемые горячими частицами, ставят дополнительную специфически легочную проблему, которая не может быть оценена правильно в рамках стандартных легочных моделей, используемых в настоящее время в радиационной гигиене. Специфика такого рода частиц состоит, во-первых, в крайне неравномерном дозовом распределении вокруг них и, во-вторых, в морфо-физиологических особенностях выведения нерастворимых частиц из легких.

Несмотря на имеющуюся информацию, современных знаний об опасности горячих частиц для оценки рисков от них пока недостаточно.

Центральной проблемой горячих частиц является вопрос - может ли точечный источник радиации обладать повышенной канцерогенностью (так наз. гипотеза горячей частицы). Теоретический расчет дозы с использованием моделей МКРЗ, в которых эта доза усредняется по массе органа (легкие), дает малые значения дозы для одной частицы в легких.

В результате Чернобыльской аварии вокруг станции и на значительных территориях Белоруссии, Украины и России сформировался радиоактивный след, радионуклидный состав которого резко неоднороден (особенно в ближней зоне), а радиоактивное загрязнение почв в значительной степени представлено в форме слаборастворимых частиц разного размера и химического состава. В периоды распространения и выпадения из первичного облака, вторичного ветрового подъема, а также в процессе хозяйственной деятельности человека эти частицы могут попадать в органы дыхания человека.

Сама по себе проблема горячих частиц не нова - ее изучение "стимулировалось" ядерными испытаниями и необходимостью обес-

печения безопасности персонала ядерных производств. Основное внимание уделялось  $\alpha$ -излучающим нуклидам из-за их высоких ЛЭП. Многочисленные эксперименты на животных в большинстве не дали подтверждения гипотезе горячей частицы. Это объясняется тем, что неподвижная  $\alpha$ -излучающая частица создает вокруг себя в пределах 2-4 клеточных слоев резко очерченную область летальных доз, за пределами которой доза резко стремится к нулю. Таким образом, становится ясным важность изучения  $\beta$ -компоненты излучения частиц, которая создает значительные области сублетальных доз, что в свою очередь является предпосылкой онкогенных эффектов.



Рис. 1. Формализованная схема оценки радиационно-гигиенической опасности горячих частиц.

Оценка рисков от горячих частиц - это комплексная задача на стыке многих научных дисциплин. Для полной оценки рисков недос-

таточно разрешения гипотезы горячей частицы. Необходимо учитывать вероятность поступления в легкие, динамику выведения и пр. На рис. 1 представлена формализованная схема оценки радиационно-гигиенической опасности горячих частиц. Схема включает в себя ряд процессов в их логической последовательности, непосредственно влияющих на выход опухолей, и ряд сопутствующих процессов, которые необходимо учитывать при определении количественных значений параметров.

### Цель и задачи исследования

Целью данной работы является исследование параметров горячих частиц после аварии на Чернобыльской АЭС и разработка на основе радиобиологического подхода методов оценки доз и рисков облучения легких человека в результате их ингаляции.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи, которые являются основными задачами диссертационного исследования:

- исследование радионуклидного состава горячих частиц;
- исследование спектрального состава  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучателей горячих частиц;
- оценка микродозиметрических характеристик горячих частиц;
- исследование физико-дозиметрических характеристик радиоаэрозольного источника, плотности горячих частиц, выпавших на почву после аварии, коэффициентов вторичного ветрового подъема;
- дозиметрическое сопровождение радиобиологического эксперимента;
- оценка сравнительного риска рака легких при заданной средней дозе на клетку в критическом объеме ткани от равномерного и от точечного источников.

### Новизна

работы состоит в том, что впервые:

- показано, что риск онкогенных эффектов от топливных горячих частиц Чернобыльского происхождения в первую очередь обусловлен  $\beta$ -компонентой излучения;
- получены физико-дозиметрические характеристики горячих частиц, выпавших в результате аварии на ЧАЭС;
- разработана и реализована система методических и радиобиологических подходов, используемых для анализа данных, связанных с облучением горячими частицами легких людей, вовлеченных в Чернобыльскую аварию;
- осуществлен сравнительный анализ величин риска злокачественной трансформации, вызванной точечным источником и источником равномерного облучения легких (модель МКРЗ).

### Практическая значимость

работы состоит в том, что

- разработаны методические подходы к оценке опасности горячих частиц как фактора внутреннего облучения;
- обоснована и реализована на практике схема радиобиологического эксперимента на клеточных культурах, включающая корректную дозиметрическую поддержку;
- для неразрушающего измерения содержания  $^{90}\text{Sr}$  в ТТЧ разработан и апробирован оригинальный спектрометрический метод анализа радионуклидного состава  $\beta$ -излучателей.

### Апробация работы

Основные положения диссертации доложены и обсуждены на: 1-й научно-практической конференции молодых ученых ВНИЦРМ АМН СССР (Киев, 1989), 1-ом Всесоюзном радиобиологическом съезде

(Москва, 1989), научно-практических конференциях "Итоги оценки медицинских последствий аварии на Чернобыльской АЭС" (Киев, 1991), "Актуальные проблемы ликвидации медицинских последствий аварии на Чернобыльской АЭС" (Киев, 1992).

#### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту**

- результаты оценки физико-дозиметрических характеристик горячих частиц, выпавших в результате аварии на ЧАЭС;
- система методических и радиобиологических подходов, используемых для анализа данных, связанных с облучением горячими частицами легких людей, вовлеченных в Чернобыльскую аварию;
- результаты сравнительного анализа величин риска злокачественной трансформации, вызванной точечным источником и источником равномерного облучения легких (модель МКРЗ).

#### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 8 работ.

#### **Структура диссертации**

Диссертация представлена на 88 страницах машинописи и состоит из введения, обзора литературы, 8 глав собственных исследований, выводов, списка литературы, списка таблиц и рисунков. Текст иллюстрирован 19 таблицами и 30 рисунками. Список литературы включает 48 библиографических ссылок, из которых 31 - отечественных и 17 - зарубежных. Имеется приложение на 26 страницах машинописи, иллюстрированное 2 таблицами и 1 рисунком.

## Содержание работы

### Изотопный состав горячих частиц

В результате аварии на Чернобыльской АЭС произошло разрушение реактора РБМК-1000. Это привело к выбросу значительного количества радиоактивных веществ в окружающую среду (по средней оценке 3.5% массы топлива, что составило около 7 тонн или же  $\sim 50$  МКи на 06.05.86 без учета газообразных продуктов деления).

Физико-химическая форма выброса кардинально отличалась от аварийных выбросов, известных до настоящего времени коммунальных аварий, включая Киштымскую, и последствий испытаний ядерного оружия. Главной особенностью выброса явилось наличие в нем широкого спектра (по размерам и активностям) труднорастворимых топливных горячих частиц. Эти частицы образовались в результате сильного диспергирования топлива и содержали наработанные в реакторе продукты деления уранового топлива. Кроме того, определенная доля частиц образовалась в результате конденсации "летучих" радионуклидов на частицах сажи и аэрозолях во время горения графитовой кладки.

Начальным объектом исследований стали частицы, обнаруженные на поверхности почвы, как наиболее подходящий объект для исследования изотопного состава, удельной активности, растворимости и микродозиметрических характеристик. Исследования выполнены на 223 наиболее крупных частицах. В дальнейшем полученные результаты были перенесены на более мелкие частицы, которые могли быть удержаны в легких. В табл. 1 сведены результаты анализа изотопного состава.

Статистический анализ выделит два типа частиц: "рутениевые" и "топливные" (ТТЧ). Активность частиц первого типа на 90%

определяет  $^{106}\text{Ru}$ . Частицы второго типа по нуклидному составу близки к отработанному реакторному топливу. Всего "рутениевые" горячие частицы составляют 13% от общего количества исследованных частиц. Существенную часть активности топливных частиц на момент измерения (1989 г.) составляли  $^{137}\text{Cs}$  (19.7%) и  $^{90}\text{Sr}$  (19.3%). К 1992 г. частицы практически полностью состоят из этих нуклидов в примерно равных количествах. Это означает, что дозовая нагрузка от горячих частиц на 3/4 определяется  $^{90}\text{Sr}$ . Предварительная  $\gamma$ -спектрометрия позволила получить среднее отношение суммарной активности изотопов плутония к активности  $^{144}\text{Ce}$  в среднем равным 0.01 на момент аварии, что несколько превосходит справочные данные.

Таблица 1. Нуклидный состав (в %) горячих частиц по типам и содержание горячих частиц различных типов в общем количестве горячих частиц. Даты измерения: 11.88 - 4.89.

Нуклид	Тип горячей частицы	
	рутениевый	топливный
$^{144}\text{Ce}$	3.6 ± 8.7	58.0 ± 19.5
$^{106}\text{Ru}$	90.9 ± 17.3	4.8 ± 9.4
$^{134}\text{Cs}$	0.4 ± 1.9	3.2 ± 4.2
$^{137}\text{Cs}$	4.3 ± 9.9	19.7 ± 15.8
$^{155}\text{Eu}$	0.04 ± 0.2	0.5 ± 0.4
$^{125}\text{Sb}$	0.04 ± 0.2	0.7 ± 0.5
$^{90}\text{Sr}$ *		19.3 ± 11.9
$\Sigma\text{Pu}$ **		0.6
Относительное содержание от общего количества, %	13.0	87.0

\* По результатам  $\beta$ -спектрометрии.

\*\* По результатам радиохимического анализа.

Для сохранения целостности частиц и возможности дальнейшего изучения их характеристик пришлось отказаться от традиционного радиохимического определения  $^{90}\text{Sr}$ . Для измерения этого "чистого"  $\beta$ -излучателя была разработана  $\beta$ -спектрометрическая методика с использованием тонкого детектора  $\text{NaI}(\text{Ti})$ . Расчетная чувствительность метода составила  $0.5 \text{ Бк} \cdot \text{проба}^{-1}$ .

### Растворимость и размеры горячих частиц

Растворимость в биологических жидкостях организма является важным вопросом в оценке биологического действия горячих частиц на ткани респираторного тракта человека. По известным литературным данным, горячие частицы могут быть отнесены к классу аэрозолей У, согласно классификации МКРЗ.

Размеры горячих частиц имеют принципиально важное значение при ингаляционном поступлении радионуклидов. В результате измерений средний размер частиц, обнаруженных на почве, составил 34 мкм. Таким образом величина удельной активности ПГЧ (с учетом плотности вещества частиц -  $9\text{-}11 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ ) на момент измерения составила величину около  $0.01 \text{ Бк} \cdot \text{мкм}^{-3}$ , а с пересчетом на момент аварии около  $0.4 \text{ Бк} \cdot \text{мкм}^{-3}$ , что хорошо согласуется с литературными данными.

Для сравнения интенсивности поступления радиоаэрозолей в легкие на начальном этапе аварии (за счет первичных выпадений) с последующим поступлением проводились исследования вторичного ветрового подъема в 30-км зоне. Результатом исследований стали усредненные значения коэффициента интенсивности ветрового подъема I и коэффициента ветрового подъема R, равных, соответственно,  $1.7 \cdot 10^{-9} \text{ сек}^{-1}$  и  $5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$ . Эта величина согласуется с литературными данными по другим видам (не только радиоактивным) загрязнений. Используя значение коэффициента интенсивности ветрового подъема

ма I и принимая время полного формирования следа приближенно равным 2 недели, можно показать, что среднее отношение интенсивностей поступления радиоаэрозолей на раннем этапе и на позднем этапе равно 487. Таким образом, наиболее опасным с точки зрения ингаляции радиоаэрозолей является начальный период аварии.

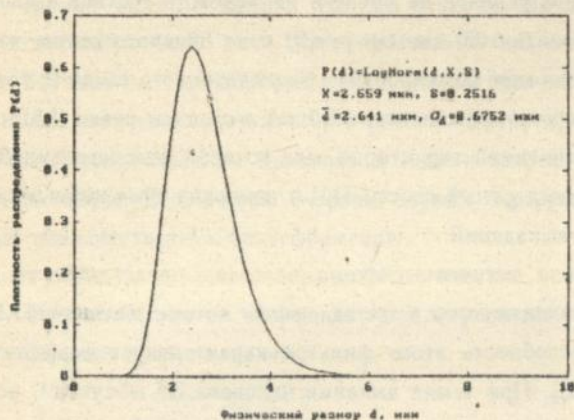


Рис. 2. Плотность распределения горячих частиц на почве по физическим размерам, аппроксимированная логнормальным распределением

$$P(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S d} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln d - \ln X}{S}\right)^2\right)$$

где параметры распределения  $P(d)$  имеют значения:  $X = 2.559$  мкм,  $S = 0.2516$ . Математическое ожидание и дисперсия этого распределения равны  $\bar{d} = 2.64$  мкм и  $\sigma_d = 0.675$  мкм

Ингаляционное поступление радионуклидов в организм человека на начальной стадии аварии на Чернобыльской АЭС является одним из малоизученных моментов, поскольку отсутствуют данные о концентрации радионуклидов в воздухе в зависимости от времени и о дисперсности аэрозолей в выбросе. Дефицит информации вы-

нуждает обратиться к методам косвенного определения величины поступления.

В работе предложен подход к расчету величины интеграла потока радионуклидов в легкие человека за период полного формирования радиоактивного следа. Расчет выполнен на основе данных о концентрации радионуклидов на почве и дисперсного состава выпадений в ближней зоне (до 60 км, см. рис.2) и из предположения, что человек все время при формировании радиоактивного следа (с точностью до режимного коэффициента, который в среднем равен 0.5) находился на ограниченной территории, для которой впоследствии был восстановлен дисперсный состав ТГЧ и измерена суммарная активность почвенных выпадений.

Формально легочная система человека представляется в виде фильтра, находящегося в ниспадающем потоке выпадений. Улавливающая способность этого фильтра характеризуется эффективным сечением  $S_{\text{eff}}$ . При темпе дыхания человека  $30 \text{ м}^3 \cdot \text{сутки}^{-1}$ , получено значение эффективного сечения  $S_{\text{eff}} = 0.6 \text{ м}^2$ . Зная  $S_{\text{eff}}$ , нетрудно оценить значение интеграла потока радионуклидов в легкие  $I$  по плотности загрязнения почвы  $\sigma$ :  $I = \sigma S_{\text{eff}}$ .

#### Микродозиметрические характеристики горячих частиц

Под микродозиметрическими характеристиками в данной работе подразумевается распределение дозы на расстояниях в диапазоне от нескольких мкм от источника и до длины максимального пробега  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучения.

Радиобиологические эффекты - гибель, злокачественное перерождение клеток, образование опухолей - в значительной степени определяются распределением дозы вокруг ТГЧ. Исследования изотопного состава показали наличие в частицах  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучающих радио-

нуклидов. Одна из задач работы состоит в оценке дозовых распределений от этих составляющих и определения их относительной значимости.

Исследование дозового поля  $\alpha$ -компоненты было ограничено измерением флюенса.  $\alpha$ -спектрометрические неразрушающие исследования горячих частиц показали, что при среднем диаметре 34 мкм поток  $\alpha$ -частиц равен 1.1 сек<sup>-1</sup>. При пересчете потока на радиус частицы в 2.5 мкм (это средний расчетный размер горячих частиц для 30-км зоны), поток составит уже 0.01 сек<sup>-1</sup>. Уже в пределах суток  $\alpha$ -компонента такой частицы приводит к гибели клетки первых 2-3 клеточных слоев. Что, в свою очередь, служит барьером и предотвращает злокачественную трансформацию.

Таким образом, наибольший радиобиологический интерес связан с  $\beta$ -составляющей горячих частиц, которая затрагивает существенно более обширные области тканей.

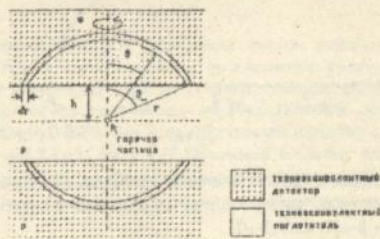


Рис. 3. Схема эксперимента по исследованию распределения дозы вокруг горячей частицы. Полная поглощенная энергия электронного потока, определяемая в эксперименте, равна

$$E(h) = \int_h^{\infty} \rho S(\Omega, r) D(r) dr$$

где  $S(\Omega, r) = 4\pi r^2 \Omega$ ,  $\Omega = 0.5(1 - \cos\theta_{\max}) = 0.5(1 - h/r)$ ,  $D(r)$  - искомое радиальное дозовое распределение.

В настоящее время существуют множество полуэмпирических методов расчета дозового распределения от точечного источника. Среди них, нашедшая в свое время широкое распространение функция Левинжера. Однако эта функция некорректна в области малых расстояний. Кроме того, все эти расчетные методы опираются на известный нуклидный состав, информация о котором не всегда доступна. Таким образом, важная роль в исследованиях принадлежит инструментальным способам измерения и верификации расчетов.

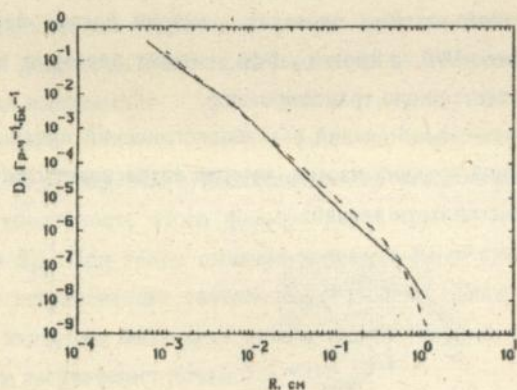


Рис. 4. Распределение мощности дозы  $D$  точечного источника как функция расстояния  $R$  до него, рассчитанное по изотопному содержанию  $\beta$ -излучателей (—) и прямо по спектру  $\beta$ -излучения(---).

С этой целью был разработан метод исследования дозового распределения. Горячая частица помещалась между двумя плоскими слоями тканезквивалентного поглотителя известной толщины (рис. 3). Суть метода заключалась в измерении спектров полного поглощения при последовательном увеличении толщины поглотителя от минимальной (5 мкм) до некоторой максимальной (1.5 мм) толщины с

последующим расчетным переходом от плоскопараллельного распределения дозы к радиальному.

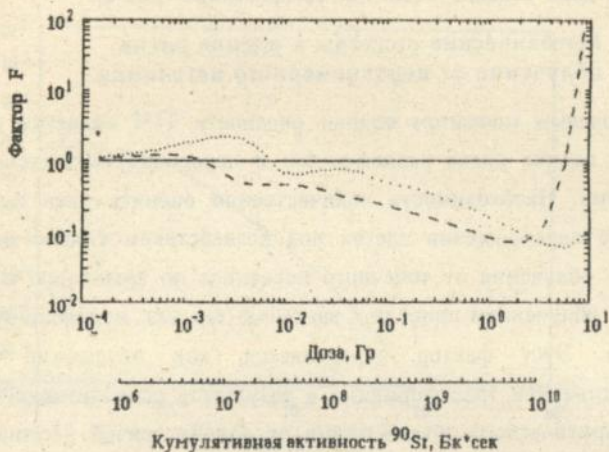


Рис. 5. Модифицирующий фактор  $F$  (отношение рисков злокачественного перерождения) воздействия горячей частицы на клеточную культуру по сравнению с равномерным облучением с той же средней дозой как функция от дозы. Риски в обоих случаях рассчитывались по квадратичной дозовой зависимости  $R=(\alpha D+\beta D^2)\exp(-\gamma D-\delta D^2)$ . Для бета-излучателей известно соотношение  $\alpha/\beta=1$  Гр и (1) —  $\gamma=0.3$  Гр $^{-1}$ ,  $\delta=0.1$  Гр $^2$  (Mauneord и Clarke, получены по случаям лейкемии у людей, переживших атомную бомбардировку), (2) —  $\gamma=0.053$  Гр $^{-1}$ ,  $\delta=0.019$  Гр $^2$  (получены из исследований по выживанию клеток V79 китайского хомяка).

Для расчетов рисков от ингаляции ТГЧ в начальный период аварии предлагается обобщенная дозовая функция  $\beta$ -излучения с составом, приведенным на 26.04.86 и нормированным на 1 Бк суммарной активности осколочных радионуклидов. Данная функция была рассчитана с помощью двух методов: по радиоизотопному составу и исходному  $\beta$ -спектру. Расчет распределения дозы по изотопному составу практически более удобен и с точки зрения наличия исходной информации и простоты расчета. Расчет распределения дозы по исход-

ному спектру значительно точнее и необходим, например, для радиобиологических экспериментов с ТГЧ *in vitro*. Расчеты по двум методам дали хорошее взаимное согласование (рис 4).

#### Методические подходы к оценке риска облучения от неравномерного источника

Ключевым моментом оценки опасности ТГЧ является сравнительная оценка риска равномерного и неравномерного (точечного) облучения. Необходимость количественно оценить риск злокачественного перерождения клеток под воздействием сильно неравномерного облучения от точечного источника по сравнению с равномерным облучением привела к введению так наз. модифицирующего фактора. Этот фактор определяется, как отношение рисков злокачественной трансформации в результате радиоактивного облучения критического объема ткани от одной горячей частицы и от равномерно распределенной активности по этому объему (рис. 5) при равных средних дозах.

Необходимость реконструкции доз и оценка опасности отдаленных последствий от ингалированных горячих частиц определяется тремя обстоятельствами. Во-первых, вероятность попадания горячих частиц на начальном этапе аварии была существенно выше из-за значительно более высокой их концентрации. Во-вторых, активность горячих частиц была намного больше в силу того, что основную долю активности составляли короткоживущие радионуклиды. И в-третьих, эта необходимость основывается на анатомо-физиологических особенностях верхних отделов респираторного тракта, которые снабжены мукоцилиарным аппаратом выведения аэрозолей. Вследствие чего, частицы, которые за время выведения могли бы создать дозу достаточную для возникновения опухоли, не обнаруживаются при патолого-анатомических исследованиях. Тогда как в нижних от-

делах респираторного тракта частицы имеют очень малую подвижность и могут быть обнаружены.

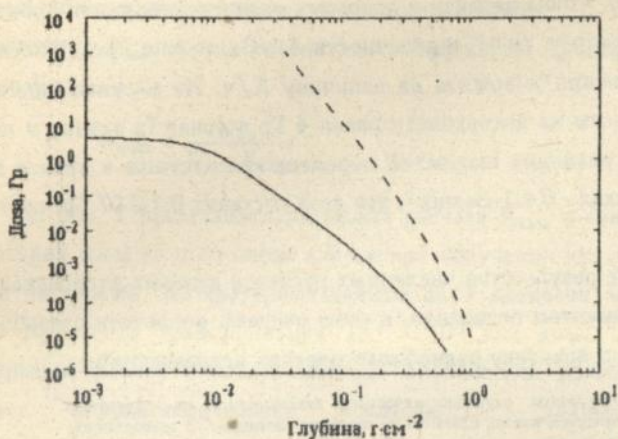


Рис. 6. Распределение дозы по глубине в биологической ткани при движении горячей частицы суммарной активностью  $A=1000$  Бк (нуклидный состав соответствует началу аварии) со скоростью  $v=1$   $\text{см}\cdot\text{ч}^{-1}$ . Для сравнения штрихованной линией проведено распределение дозы от этой же частицы, зафиксированной в точке наблюдения на время равное времени интегрирования движущейся частицы  $t=2R_m/v$ , где  $R_m$  максимальный пробег электрона заданного спектра.

Транспортный отдел легких имеет два типа бронхов, в зависимости от анатомического строения стенки и выстилающих тканей, - гладкие бронхи и трахея с крупными бронхами, имеющие мукоцилиарный аппарат. Как следствие, это приводит к разному времени выведения, обусловленному различием в механизмах экскалации. Методы расчета доз для гладких бронхов и крупных различны в связи с принципиально разной динамикой движения частицы по стенке. В первом случае частица закрепляется на стенке бронха и удерживается за счет слизи долгое время (период полувыведения до 5 лет), а затем случайным образом выводится. Для второго случая харак-

терно равномерное поступательное движение в сторону выведения, обусловленное мерцательным эпителием.

На рис. 6 представлен результат расчета дозовых нагрузок на трахею для скорости перемещения частицы  $1 \text{ см}\cdot\text{ч}^{-1}$  и активности  $1 \text{ кБк}$ . Для того, чтобы перейти к дозовому распределению для произвольной скорости  $v$ ,  $\text{см}\cdot\text{ч}^{-1}$ , и активности  $A$ ,  $\text{кБк}$ , нужно представленное распределение умножить на величину  $A/v$ . Из рисунка видно, что уровень дозы на поверхности равен  $4 \text{ Гр}$  в точке (а значит и на клетку). Для реальных скоростей перемещения частицы в трахее и крупных бронхах -  $0.1\text{-}1 \text{ см}\cdot\text{мин}^{-1}$ , эта доза составит  $0.7\text{-}0.07 \text{ Гр}$ , соответственно.

Совпадение результатов численных расчетов дозовых распределений с экспериментом позволило, в свою очередь, воплотить разработанный метод в практику радиобиологических исследований.

Таблица 2. Результаты радиобиологического эксперимента по облучению культуры клеток СЗН10Т1/2 горячими частицами. В эксперименте контролировались выживаемость клеток и колониеобразование II и III типов по Reznikoff, количество клеток в одной чашке  $N_{\text{cells}} \cdot 2 \cdot 10^5$ , диаметр чашки -  $60 \text{ мм}$ , время экспозиции  $120 \text{ часов}$ .

№ серии	Ср. доз, Гр	Выживаемость	Кол-во колоний
8	10.	0.05	16
1	0.5	0.7	48
2	0.12	0.9	80
4	0.1	0.9	80
5	0.01	0.99	76

В настоящее время совместно с сотрудниками Института Проблем Онкологии и Радиобиологии АН Украины проводится сравнительный радиобиологический эксперимент по облучению культур клеток СЗН10Т1/2 *in vitro* равномерно распределенным источником  $\beta$ -излучения и реальными горячими частицами, отобранными на

почве. Первые результаты этого эксперимента представлены в табл. 2.

Используя известные значения выживаемости  $K_{\text{surv}}$  и колониеобразования  $N_{\text{col}}$ , можно рассчитать коэффициент трансформации по формуле

$$K_{\text{trans}} = \frac{N_{\text{col}}}{N_{\text{cells}} \cdot K_{\text{surv}}}$$

На рис. 7 представлен результат расчета  $K_{\text{trans}}$  в зависимости от средней дозы на популяцию клеток при облучении культуры горячими частицами. Литературные данные дают диапазон значений для коэффициента трансформации  $10^{-4}$  -  $10^{-3}$  для дозы 1 Гр. Таким образом, расчет с использованием обобщенной дозовой функции дает удовлетворительное согласие с данными других экспериментальных работ.

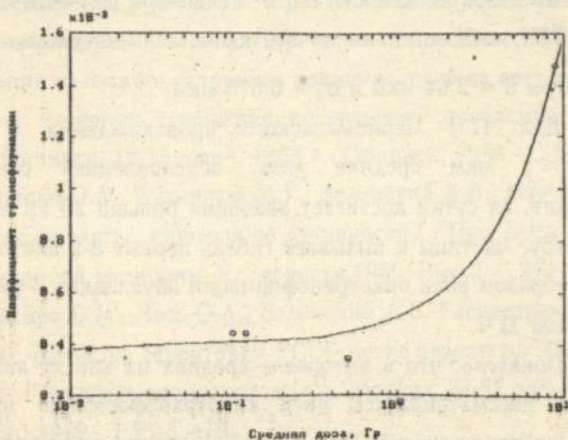
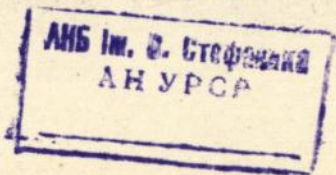


Рис. 7. Зависимость коэффициента трансформации от средней дозы, полученная в результате обработки данных радиобиологического эксперимента по облучению культуры клеток СЗН10Т1/2 горячими частицами.



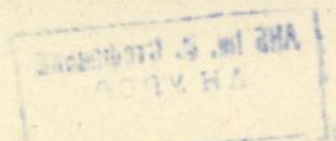
## Выводы

1. Анализ полученных характеристик горячих частиц, выброшенных в результате аварии на ЧАЭС в пределах 30-км зоны, показал, что эти частицы по радионуклидному составу и физико-химическим свойствам являются диспергированным топливом реактора, среди них имеется небольшая часть (около 10%) рутениевых частиц. По растворимости горячие частицы относятся к классу Y, согласно классификации МКРЗ. Средний диаметр ТГЧ составил 2.5 мкм при плотности 9-11 г·см<sup>-3</sup> и удельной активности 0.4 Бк·мкм<sup>-3</sup> на момент аварии. Показано, что через 5 лет после аварии активность ТГЧ определяют практически только два радионуклида - <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr - приблизительно в равном соотношении.

2. Наиболее опасным с точки зрения ингаляции радиоаэрозолей является начальный период аварии. Интеграл потока активности ТГЧ в легкие за весь период выпадений аэрозолей в 30-км зоне приближенно равен активности 0.6 м<sup>2</sup> почвы при условии, что распределение ТГЧ, выпавших на почву, является логнормальным и имеет параметры  $\bar{d} = 2.64$  мкм и  $\sigma_d = 0.675$  мкм.

3. Для ТГЧ Чернобыльского происхождения с размерами больше 1 мкм средняя доза, обусловленная  $\alpha$ -компонентой излучения, за сутки достигает значения больше 20 Гр в радиусе 40 мкм вокруг частицы и вызывает гибель первых 3-х клеточных слоев. Таким образом риск онкотрансформации обусловлен  $\beta$ -составляющей излучения ТГЧ.

4. Показано, что в интервале средних на клетку доз 0-10 Гр, в котором рассматривается риск онкотрансформации критического объема от неподвижной ТГЧ, можно выделить три подинтервала по степени риска относительно размерного источника  $\beta$ -облучения. В



интервале доз  $0-10^3$  Гр риски от ТГЧ и равномерного источника совпадают. В диапазоне доз  $10^3 - 10^2$  Гр риск от ТГЧ превышает не более, чем в 2 раза риск от равномерного облучения. И, наконец, в диапазоне от  $10^2$  до 10 Гр облучение от ТГЧ менее эффективно, чем равномерное. Среднему поддиапазону доз  $10^3 - 10^2$  Гр соответствует ТГЧ размером около 1 мкм, облучающая критический объем ткани на протяжении 1 года.

5. Показано, что энергетический спектр  $\beta$ -излучения частицы может быть использован для оценки дозового распределения без определения изотопного состава. Получено удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных методов оценки дозовых распределений в биологической ткани.

#### Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Бондаренко О.А., Гаргер Е.К. Пространственно временной ход полей концентраций и выпадений аэрозолей в 30-км ЧАЭС. Учет обеднения наземного источника радионуклидов за счет ветрового подъема: Всесоюз. совещание, посвященное проблемам Чернобыля, Обнинск, 12-15 июня, 1988 г.- Обнинск, 1988.- С.144-146.
2. Бондаренко О.А., Бузынный М.Г., Зеленский А.В.. Изучение распределения частиц аэрозоля по активности // Проблемы радиационной медицины.-К.:Здоровья,1989.-Вып.2.-С.271-272.
3. Бондаренко О.А., Лось О.А., Зеленский А.В. Распространенность горячих частиц на территории УССР после аварии на ЧАЭС: Тез. докл. I Всесоюз. радиобиол. съезд, Москва, 21-27 авг. 1989.- М.: Б.и., 1989.- Т.2.- С.476.
4. Бондаренко О.А., Лось И.П., Репин В.С. Оценка вклада горячих частиц в корневое поступление радионуклидов // Актуальные

проблемы радиационной медицины: Матер. республ. конф., Киев, 17-19 окт., 1989 г.- К., 1989.- С.82-88.

5. Репин В.С., Чумак В.В., Берковский В.Б., Нечаев С.Ю., Бондаренко О.А. Дозообразующие факторы внешнего и внутреннего облучения на различных этапах аварии на Чернобыльской АЭС// Мед. последствия аварии на Чернобыльской АЭС: Информ. бюл./ ВНИЦРМ АМН СССР.- К., 1991.- С.92-100
6. Бондаренко О.А., Сорока С.В., Фризюк М.А. Исследование микродозиметрических характеристик горячих частиц после аварии на ЧАЭС// Проблемы радиационной медицины.- К.:Здоровья,1992.-Вып.4.- С. 24-28.
7. Бондаренко О.А., Зеленский А.В., Репин В.С. Пути совершенствования и особенности использования метода бета-спектрометрии стронция-90 после Чернобыльской аварии. (Направлено для опубликования в "Вестник АМН СССР" , г. Москва.)
8. Бондаренко О.А. Два метода расчета дозового распределения вокруг точечного источника бета-излучения. (Отправлено для опубликования в журнал "Чернобыль", г. Москва.)

469305

1. Голубев В. В. // Журнал СВН. - 1988. - № 1. - С. 10-12.

2. Голубев В. В., Чумаков В. В., Давыдов В. В., Давыдов С. В., Давыдов О. А. // Доклады Академии наук СССР. - 1988. - № 1. - С. 10-12.

3. Давыдов В. В., Чумаков В. В., Давыдов В. В., Давыдов С. В., Давыдов О. А. // Доклады Академии наук СССР. - 1988. - № 1. - С. 10-12.

4. Давыдов В. В., Чумаков В. В., Давыдов В. В., Давыдов С. В., Давыдов О. А. // Доклады Академии наук СССР. - 1988. - № 1. - С. 10-12.

5. Давыдов В. В., Чумаков В. В., Давыдов В. В., Давыдов С. В., Давыдов О. А. // Доклады Академии наук СССР. - 1988. - № 1. - С. 10-12.

6. Давыдов В. В., Чумаков В. В., Давыдов В. В., Давыдов С. В., Давыдов О. А. // Доклады Академии наук СССР. - 1988. - № 1. - С. 10-12.

7. Давыдов В. В., Чумаков В. В., Давыдов В. В., Давыдов С. В., Давыдов О. А. // Доклады Академии наук СССР. - 1988. - № 1. - С. 10-12.

8. Давыдов В. В., Чумаков В. В., Давыдов В. В., Давыдов С. В., Давыдов О. А. // Доклады Академии наук СССР. - 1988. - № 1. - С. 10-12.

9. Давыдов В. В., Чумаков В. В., Давыдов В. В., Давыдов С. В., Давыдов О. А. // Доклады Академии наук СССР. - 1988. - № 1. - С. 10-12.

10. Давыдов В. В., Чумаков В. В., Давыдов В. В., Давыдов С. В., Давыдов О. А. // Доклады Академии наук СССР. - 1988. - № 1. - С. 10-12.