

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

М - 256

18-82-9

МАРЕННЫЙ

Альберт Михайлович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ
ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
В КОСМИЧЕСКИХ
РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ**

**Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1982

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Институте медико-биологических проблем МЗ СССР.

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор

Е.Е.Ковалев

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

В.И.Иванов

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

В.П.Перелыгин

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва

Защита состоится "___" _____ 19__ г. в "___" час.
на заседании Специализированного совета Д.047.01.05
при лаборатории нейтронной физики и лаборатории ядерных
реакций Объединенного института ядерных исследований
(И41980, г.Дубна, Московская обл.)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан "___" _____ 19__ г.

Ученый секретарь
Специализированного совета

/Ю.В.Таран/

Актуальность задач, решаемых в диссертации, вытекает из проблемы обеспечения радиационной безопасности и определяется необходимостью проведения расчетов, связанных с оценкой степени поражения космонавтов и биоконтекста космических кораблей тяжелыми ядрами космического излучения, а также разработки мер защиты от такого рода поражений и их профилактики. Для этого требуются детальные данные как о действии тяжелых ядер на биологические объекты в целом и отдельные их структуры непосредственно в условиях космического полета, так и о потоках и спектрах этих частиц на трассах полетов космических кораблей. Важность наличия этих данных возрастает в связи с увеличением длительности и дальности космических полетов.

Основная цель работы состояла в разработке и внедрении в практику космических исследований метода идентификации, спектрометрии и топической регистрации прохождения тяжелых ядер с зарядом от 6 до 26 в интервале энергий 100-800 МэВ/нуклон, позволяющего в комплексном эксперименте получать радиационно-физические данные о поле излучения и радиобиологические - о действии тяжелого компонента космического излучения на биологические объекты. Дополнительная цель работы заключалась в применении разработанного метода при проведении ряда экспериментальных исследований.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней обоснован и тщательно разработан метод идентификации тяжелых ядер при помощи полимерных диэлектрических трековых детекторов (ДТД), позволяющий достичь высокого зарядового, массового и пространственного разрешения.

Проведены детальные исследования регистрационных характеристик детекторов на основе отечественных промышленных материалов; показано, что порог регистрации тяжелых ядер в полимерных детекторах есть функция их энергии.

Впервые в СССР проведены с высоким разрешением систематические исследования потоков и спектров тяжелых ядер с зарядом более 6 внутри космических кораблей; осуществлена серия радиобиологических экспериментов типа "Биоблок".

Практическая значимость работы заключается в том, что результаты исследований и методических разработок, полученные в процессе ее проведения, позволили впервые осуществить детальные исследования потоков и спектров тяжелых ядер космического излучения на трассах полетов советских космических кораблей, а также начать планомерное

изучение качественных и количественных закономерностей действия тяжелых ядер на биологические объекты в условиях космического полета.

Результаты методических разработок могут быть использованы в космофизических исследованиях, а также при проведении ядерно-физических и радиобиологических экспериментов на ускорителях тяжелых ядер высоких и средних энергий и реакторах. Радиационно-физические данные могут быть использованы при составлении модели радиационной обстановки в околоземном пространстве.

Автор защищает:

1. Результаты разработки метода идентификации тяжелых ядер по максимальной травимой длине трека в блоке ДТД.
2. Результаты расчетно-экспериментальных исследований регистрационных характеристик детекторов на основе отечественных нитрата целлюлозы и лавсана.
3. Методики планирования, проведения и обработки результатов радиобиологических экспериментов типа "Биоблок" (радиационно-физическая часть).
4. Комплекс методов, алгоритмов и оборудования для обработки результатов измерений в блоках ДТД.
5. Результаты исследований флэнса, плотности потока и спектров тяжелых ядер космического излучения на околоземных орбитах внутри и вне космических кораблей и в верхних слоях атмосферы.
6. Метод идентификации тяжелых ядер по разности выявляемых длин треков в блоке детекторов с различными порогами регистрации, способы и устройства для фиксации интервала времени регистрации частиц, предложенные для использования в перспективных радиобиологических и радиационно-физических экспериментах.

Апробация работы. Основные материалы диссертации докладывались и обсуждались на Всесоюзном совещании по вопросам биологического действия ядерных излучений высоких энергий (Пушино, 1973г.), Всесоюзном совещании по радиобиологическим экспериментам в космосе (Пушино, 1975г.), Всесоюзном совещании по биологическому действию радиации и невесомости (Пушино, 1980г.), совещаниях рабочей группы по космической биологии и медицине "Интеркосмос" (Варна, 1975г., Сухуми, 1977г.), международных конференциях по ядерной фотографии и твердотельным трековым детекторам (Барселона, 1970г., Лион, 1979г.) заседаниях КОСПАР (1977, 1978, 1979, 1980 г.г.), совещаниях советско-французской и советско-американской рабочих групп по космической биологии и медицине.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работ и получено 5 авторских свидетельств.

Структура и объем работ. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Основное содержание работы изложено на 144 страницах, имеется 17 таблиц и 57 рисунков. Список литературы включает 199 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

ВВЕДЕНИЕ. Во введении отмечается актуальность проведения радиобиологических и радиационно-физических исследований, связанных с тяжелыми ядрами космического излучения, сформулированы цель диссертационной работы и положения, защищаемые автором. Дано краткое содержание диссертации по главам.

ОБОСНОВАНИЕ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В первой главе рассмотрены данные, характеризующие радиационную опасность тяжелых ядер космического излучения, приведены имеющиеся сведения о потоках и спектрах тяжелых ядер и сделан обзор методов идентификации этих частиц. Особое внимание уделено регистрации и идентификации тяжелых ядер при помощи диэлектрических трековых детекторов. На основе обзора сформулированы цель данной работы и задачи, решение которых необходимо для ее достижения.

Необычно высокая выраженность радиобиологических эффектов под действием тяжелых ядер, обнаруженная в отдельных экспериментах на высотных аэростатах и первых космических кораблях, заставила считать их одним из наиболее существенных источников радиационной опасности в космосе. Это стимулировало начало в 60-х годах на ускорителях СССР и США изучения действия тяжелых ионов на биологические объекты. Однако в силу ряда причин такие эксперименты могут рассматриваться лишь как модельные. Во всей же полноте действие тяжелых ядер космического излучения в настоящее время может быть изучено только в условиях космического полета. Вместе с тем опыт предшествующих экспериментальных исследований показал, что при сравнительно кратковременном экспонировании биообъектов в околоземном космическом пространстве трудно выявить и количественно изучить пораженные объекты на фоне значительно большего количества объектов, не затронутых тяжелыми ионами. Поэтому в подобных исследованиях необходимо использовать метод, позволяющий проводить отбор пораженных биообъектов, или с большой точностью указывать координаты прохождения частиц через биообъекты. Выделение пораженной структуры в совокупности со знанием заряда и энергии частицы даст возможность количественно описать наблюдаемые эффекты.

Обзор имеющихся в литературе сведений о распространенности,

компонентном и энергетическом составе космических лучей в совокупности с радиобиологическими данными позволил заключить, что наиболее существенной с точки зрения радиационной безопасности в интересующем нас аспекте является область тяжелых ядер от углерода до железа в диапазоне энергий от 100 до 800 МэВ/нуклон. Вместе с тем вплоть до настоящего времени данные о потоках и спектрах указанной группы ядер носят лишь фрагментарный характер.

Анализ литературы по экспериментальным методам ядерной физики с учетом требований и ограничений, вытекающих из существа космических радиобиологических экспериментов и технических возможностей их реализации, показал, что для решения поставленной задачи наиболее перспективно использование ДТД.

Минимальный порог регистрации имеют, как правило, полимерные материалы. В диссертации проведен детальный анализ литературных данных по способам измерения регистрационных характеристик детекторов (РХ), результатам исследований зависимости РХ от типа полимерных материалов, способов химической обработки, условий хранения.

В заключении раздела сделан критический обзор и анализ существующих методов идентификации тяжелых ядер при помощи ДТД.

К началу наших исследований ДТД активно использовались для проведения дозиметрических и ядерно-физических экспериментов. В то же время имелось лишь несколько работ по регистрации тяжелых ядер на космических кораблях "Аполлон" и совершенно отсутствовали сведения о применении ДТД в радиобиологических исследованиях. Детекторы зарубежных фирм были для нас недоступны, а отечественная промышленность не выпускала материалов, предназначенных для использования в качестве детекторов.

На основании литературного обзора сформулированы основные задачи, решение которых необходимо для достижения цели данной работы:

исследование отечественных полимерных материалов для выяснения возможности использования их в качестве детекторов; разработка и создание аппаратуры для выявления и анализа треков; исследование регистрационных характеристик детекторов и зависимости их от ряда факторов (способ обработки детекторов, хранение, модифицирующие воздействия);

обоснование и разработка методов идентификации тяжелых ядер по измерениям в блоках ДТД; создание комплекса программ для математического обеспечения метода;

обоснование и разработка схемы проведения радиобиологических экспериментов с использованием ДТД; разработка и создание аппаратуры для проведения радиобиологических и радиационно-физических экспериментов на космических кораблях;

проведение и обработка результатов радиобиологических и радиационно-физических экспериментов на орбитах космических кораблей.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГИСТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Экспериментальные исследования РХ детекторов проводились с помощью разработанного нами оборудования, технические данные которого приведены в диссертации. Калибровочное облучение материалов детекторов проведено путем набора многозарядных ионов с энергией до 10 МэВ/нуклон на ускорителях У-150, У-300, У-400 ОИЯИ (Дубна). Кроме того, блоки детекторов были облучены высокоэнергетичными пучками ядер аргона и железа на ускорителе "Bevalak" (Беркли, США). Химическая обработка детекторов осуществлялась в сконструированной на базе термостата "Neothermostat" травильной установке. Сканирование детекторов и измерение треков проводили при помощи модифицированных нами микроскопов МБС, МПЭ-1 и координатографа "Askorecord".

Для исследований РХ детекторов, а также при планировании и анализе результатов экспериментов с их использованием, необходимы подробные данные по пробегам и линейным передачам энергии (ЛПЭ) тяжелых ядер в различных средах в широком диапазоне их зарядов и энергий. В связи с этим нами был разработан алгоритм и проведены расчеты на ЭВМ величин полных и ограниченных ЛПЭ, пробегов и зависимости ЛПЭ от остаточного пробега для всех изотопов тяжелых ядер с зарядом $1 \leq Z \leq 32$ в диапазоне энергий от 10^{-1} до $1,4 \cdot 10^3$ МэВ/нуклон в материалах детекторов: нитрате целлюлозы, лавсане, поликарбонате, слюде, фторопласте; конструкционных материалах - алюминии, меди и свинце, а также в воздухе и биологической ткани. Результаты расчетов табулированы, причем разбиение по энергии позволяет проводить линейную интерполяцию с точностью 1-2%. Среднеквадратичная погрешность данных в области энергий ниже 22 МэВ/нуклон нигде не превышает 5%, а при более высоких энергиях - менее 1%.

Предварительное обследование ряда отечественных промышленных полимерных пленок показало, что наиболее приемлемыми для использования в качестве детекторов являются нитрат целлюлозы КНЦ (ГОСТ 21228-75) и лавсан (ТУШХЗ-80-63). Ниже приведены результаты исследования их РХ.

Нитрат целлюлозы. Результаты измерения скорости травления материала \bar{U}_N показывают, что при травлении в водном растворе $NaOH$ (температура 293-323К, концентрация - (2-10N), величина \bar{U}_N практически постоянна по глубине материала. Величина \bar{U}_N возрастает с увеличением концентрации и темпера-

туры раствора. При низких температурах раствора замечено большое количество трекоподобных дефектов, а при низких концентрациях - разбухание материала. Величина \bar{U}_M обеих поверхностей практически одинакова.

В работе исследована зависимость прозрачности \bar{D} сухих и мокрых образцов материала в зависимости от условий травления.

Исследование однородности РХ нитрата целлюлозы КНЦ по площади листов показало, что в пределах партии листов наблюдается разброс, однако имеются листы практически идентичные. Поэтому детекторы, использованные нами здесь и для проведения космических исследований, изготовлены из листов, отобранных из большой партии материала (~100 листов). Материал хранился в темном помещении при комнатной температуре не менее двух лет.

По результатам исследований скорости травления материала \bar{U}_M , однородности материала и прозрачности \bar{D} , был выбран режим травления: 6N-водный раствор NaOH, насыщенный продуктами травления; температура - 323К.

Установлено, что пороговая величина $ЛПЭ_{1000,0}$ изменяется с пороговой энергией регистрации $E_{пор}$ от 197 ± 7 кэВ/мкм НЦ при $E_{пор} \approx 1-10$ МаВ/нуклон до $214 \pm$ кэВ/мкм НЦ при $E_{пор} = 330$ МаВ/нуклон, т.е.

$$ЛПЭ_{1000,0} = 184 + 12 \lg E_{пор}$$

Скорость травления \bar{U}_T увеличивается от ~50мкм/час при $ЛПЭ_{1000} \approx 200$ кэВ/мкм до ~150мкм/час при $ЛПЭ_{1000} \approx 500$ кэВ/мкм, после чего остается практически неизменной.

Критический угол регистрации $\theta_{кр}$ слабо возрастает с уменьшением $ЛПЭ_{1000}$ частиц. Это позволяет использовать значение $\theta_{кр} = 4-5^\circ$.

Лавсан. В силу того, что лавсан применялся в нашей работе только как интегральный пороговый регистратор частиц с большими значениями $ЛПЭ$, исследования его регистрационных характеристик были менее широкими. Для травления использовался известный из литературы режим: 20%-водный раствор NaOH, температура - 293К, длительность - 48 часов. По нашим измерениям порог регистрации $ЛПЭ_{1000,0} = 610 \pm 30$ кэВ/мкм. Критический угол регистрации $\theta_{кр} \approx 7^\circ$.

В диссертации описаны методика и результаты изучения сохранности латентных треков при хранении детекторов до двух лет в воздухе и в воде в зависимости от температуры и влажности среды. Результаты указывают на хорошую сохранность треков. Воздействие на детекторы гамма-лучей в дозах до $\sim 5 \cdot 10^3$ Гр не приводит к заметной регрессии треков.

Из проведенных исследований в общем следует, что нитрат целлю-

лозы КНЦ и лавсан являются достаточно однородными материалами с точки зрения воспроизводимости РХ. Полученные характеристики этих материалов позволяют использовать их в качестве детекторов-регистраторов ядер с зарядом $6 \leq Z \leq 26$. Более чувствительным из двух изученных материалов является нитрат целлюлозы. Однако резкое возрастание скорости травления вдоль трека \bar{U}_T и выход на плато зависимости $\bar{U}_T(ЛПЭ_{1000})$ вблизи порогового значения $ЛПЭ_{1000,0}$, а также большая толщина и плохое качество поверхности имеющегося материала обуславливают невозможность проводить идентификацию частиц с зарядом $Z < 10$ по скорости травления \bar{U}_T и низкую точность идентификации более тяжелых частиц. В обоих материалах латентные треки сохраняются в течение, по крайней мере, двух лет при параметрах среды, характерных для внутренних объемов космических кораблей. Это позволяет проводить их длительное экспонирование в условиях космического полета.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРОВ

ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

В третьей главе приводится обоснование метода идентификации тяжелых заряженных частиц по максимальной травимой длине трека (МТД-метод), рассмотрено его разрешение по зарядам и массам, проведен подробный анализ источников и величин расчетных и экспериментальных погрешностей, описан математический аппарат для обработки результатов измерений в многослойных блоках ДТД и восстановления спектров. Часть главы посвящена применяемой нами методике сканирования детекторов. В заключении дается описание предложенных нами перспективных методов идентификации тяжелых ядер, способов и устройств для фиксации интервала времени регистрации частиц.

При травлении ДТД, экспонированных тяжелыми заряженными частицами (ТЗЧ), вдоль траекторий частиц появляются конусы травления - трек-сегменты. Первые трек-сегменты появляются по направлению полета частиц в тех точках, где ограниченные линейные передачи энергии $ЛПЭ_{\omega}$ становятся больше пороговой для данного детектора величины $ЛПЭ_{\omega,0}$. Последние вдоль траекторий трек-сегменты будут находиться практически в точках остановки частиц. Приведенные в работе приближенные выкладки показывают, что длина участка траектории $МТД_{Z,M} = R_{Z,M,макс}$ частицы с зарядом Z и массой M в полимерном ДТД с порогом регистрации $ЛПЭ_{\omega,0}$ связана с параметрами частицы и детектора следующим соотношением:

$$МТД_{Z,M} \geq R_{Z,M,макс} = K \cdot ЛПЭ_{\omega,0}^{-1/4} \cdot M^{1/4}$$

из которого следует, что $МТД_{Z,M}$ сильно зависит от заряда частицы и,

следовательно, является надежным критерием идентификации частиц. МТД также пропорциональна массе частиц, что в принципе позволяет идентифицировать изотопы.

Реальные возможности МТД-метода идентификации продемонстрированы в диссертации применительно к нитроцеллюлозному детектору КНЦ, для которого были рассчитаны значения МТД_{Z, M} всех изотопов тяжелых ядер с зарядом $2 \leq Z \leq 30$. Показано, что с точностью до нескольких процентов справедливо следующее соотношение :

$$R_{Z, M, \text{макс}} (\text{кг/м}^2) = \begin{cases} 4,7 \cdot 10^{-5} M Z^{2,0} & \text{при } 5 \leq Z \leq 12 \\ 9,3 \cdot 10^{-6} M Z^{2,7} & \text{при } 13 \leq Z \leq 30 \end{cases},$$

которое позволяет оценить зарядовое разрешение метода при использовании детектора КНЦ. Принимая во внимание, что $M \approx 2Z$ практически для всех наиболее распространенных изотопов элементов с зарядом $5 \leq Z \leq 12$ и $M \approx 2,36Z$ - в диапазоне $13 \leq Z \leq 30$, имеем :

$$R_{Z, \text{макс}} = \begin{cases} 9,5 \cdot 10^{-5} Z^{3,0} & \text{при } 5 \leq Z \leq 12 \\ 2,2 \cdot 10^{-5} Z^{3,7} & \text{при } 13 \leq Z \leq 30 \end{cases},$$

откуда

$$\frac{\Delta Z}{Z} \approx \begin{cases} 0,33 (\Delta R_{Z, \text{макс}} / R_{Z, \text{макс}}), & 5 \leq Z \leq 12 \\ 0,27 (\Delta R_{Z, \text{макс}} / R_{Z, \text{макс}}), & 13 \leq Z \leq 30 \end{cases}.$$

Как видно из последнего соотношения, при равной относительной погрешности измерения МТД точность идентификации в рассматриваемом диапазоне зарядов примерно одинакова. Полагая вклад экспериментальных погрешностей в $\Delta R_{Z, \text{макс}}$ равным нулю, а расчетных - 4%, можно видеть, что принципиально возможное разрешение метода $\Delta Z/Z = 1-2\%$. Соотношение для $\Delta Z/Z$ может быть записано также в виде :

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \begin{cases} 3,5 \cdot 10^{-3} \Delta R_{Z, \text{макс}} Z^{-3,0}, & 5 \leq Z \leq 12 \\ 1,2 \cdot 10^{-4} \Delta R_{Z, \text{макс}} Z^{-3,7}, & 13 \leq Z \leq 30 \end{cases},$$

из которого следует, что при равной абсолютной погрешности $\Delta R_{Z, \text{макс}}$, относительная точность идентификации увеличивается с ростом заряда частицы. Что касается абсолютной погрешности определения заряда, то из приведенных соотношений следует, что с увеличением заряда она возрастает при равной относительной погрешности и убывает при равной абсолютной погрешности $\Delta R_{Z, \text{макс}}$. В диссертации детально рассмотрены источники погрешностей расчетного и экспериментального характера, дающих вклад в $\Delta R_{Z, \text{макс}}$, а также процессы, обуславливающие априорный разброс величины $R_{Z, \text{макс}}$ - страгглинг и фрагментация ядер в пределах МТД. Показано, что с учетом вклада рассмотренных источников погрешностей в величину $\Delta R_{Z, \text{макс}}$ точность идентификации заряда частиц по МТД-методу составляет 2-4%.

Использование МТД-метода идентификации предполагает в качестве результатов измерений наличие значений МТД треков. В связи с этим

нами был разработан способ подготовки детекторов к просмотру, благодаря которому стало возможно непосредственно измерять полную длину треков, либо участки треков, проходящих через 8-10 и более детекторов. Использование способа позволило увеличить производительность просмотровых работ в 6-8 раз при одновременном сокращении количества ошибок. Получаемая информация компактна, что облегчает ввод ее в ЭВМ для последующей обработки.

Энергия идентифицированных частиц определялась по длине участка траектории L частицы в пределах блока. Таким образом, конечный результат измерений в блоке детекторов - длины R, L для каждого трека. Этих данных достаточно для определения с известной точностью заряда и энергии всех зарегистрированных частиц. Однако процедура восстановления зарядовых и энергетических спектров не может быть сведена к сортировке и суммированию частиц в соответствии с их Z и E . Это обусловлено тем, что в условиях малой статистики частиц, с которой мы, как правило, имеем дело, становится существенной неопределенность в определении заряда в случаях перекрывающихся интервалов МТД для соседних зарядов. Наличие погрешности $\Delta R_{Z, \text{макс}}$ в общем увеличивает количество таких ситуаций. В связи с этим в диссертации уделено большое внимание разработке методики восстановления зарядовых и энергетических спектров, использование которой позволяет учесть отмеченные обстоятельства.

Для проведения обработки результатов измерений в полном объеме, начиная от обсчета данных, получаемых непосредственно в процессе измерений, и кончая восстановлением зарядовых и энергетических спектров, был разработан алгоритм и составлена программа "JAVA" на языке Fortran применительно к ЭВМ ЕС-1030. Программа построена по блочно-функциональному принципу так, что отдельные блоки могут использоваться самостоятельно.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКОВ И СПЕКТРОВ

ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В четвертой главе изложены условия проведения и результаты радиационно-физических исследований с нашим участием. Эксперименты были проведены в 1973-79 гг. на ряде космических кораблей: искусственных спутниках Земли (ИСЗ) "Космос-605, 613, 690, 782, 936, 1129", корабле "Союз-16", комплексах "Союз-20 - Салют-4", "Союз-Аполлон", "Союз-32 - Салют-6" и в верхних слоях атмосферы.

Измерения флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) носили систематический характер и относились в основном к ядрам с зарядом $Z > 6$ -7 и ЛПЭ $1000-2000$ кэВ/мкм. На ИСЗ измерения проводились как на на-

ружной поверхности, так и внутри, за различными слоями защиты, вплоть до $240 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$; на орбитальных пилотируемых станциях (ОПС) – в различных точках внутри станции. В зависимости от периода измерений и места установки детекторов плотность потока ТЗЧ составила: $(0,1-0,8) \cdot 10^4 \text{ м}^{-2} \cdot \text{сутки}^{-1}$ на ИСЗ и $(0,1-0,35) \cdot 10^4 \text{ м}^{-2} \cdot \text{сутки}^{-1}$ на ОПС. Плотность потока в верхних слоях атмосферы (остаточная атмосфера $50-250 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$) равна $(0,1-0,3) \cdot 10^4 \text{ м}^{-2} \cdot \text{сутки}^{-1}$. В диссертации полученные данные приведены полностью, и на их основе сделаны некоторые выводы, касающиеся зависимости величины флюенса и плотности потока ТЗЧ от периода и условий измерения. Сравнение части наших результатов с аналогичными результатами, полученными американской группой Бентона в измерениях на ОПС "Скайлаб", указывает на хорошее их согласие. На ИСЗ "Космос-690,782" при помощи набора различных детекторов, установленных на внешней поверхности, проведены также измерения флюенса низкоэнергетичных ($E=0,3-5,0 \text{ МэВ/нуклон}$) тяжелых ядер космического излучения.

Одной из наиболее важных характеристик космических излучений с точки зрения проблемы радиационной безопасности является спектр ЛПЭ. Измерения интегральных спектров ЛПЭ в интервале $10^2 < \text{ЛПЭ}_{1000} < 10^3 \text{ кэВ/мкм}$ проводились нами на нескольких спутниках двумя способами: а) при помощи "сэндвичей" ДТД с различными порогами регистрации; б) с использованием зависимости скорости травления вдоль трека от ЛПЭ. Результаты измерений показывают, что спектры описываются степенной зависимостью от ЛПЭ с показателем $\gamma = (2,5-2,7)$, который слабо зависит от периода измерений и толщины экранирующего материала. Проведено сравнение с аналогичными результатами других авторов. Спектры были использованы для оценки доли пораженных клеток мозга человека частотами с $120 < \text{ЛПЭ}_{\infty} < 280 \text{ кэВ/мкм}$, содержание которых в галактическом космическом излучении не превышает 0,1%. Оказалось, что за 18,5 суток на околоземной орбите с наклоном $\sim 62^\circ$ может быть поражено до $3,7 \cdot 10^{-4}$ клеток.

Зарядовые спектры исследовались нами в ряде экспериментов. В качестве примера в диссертации наиболее подробно описаны условия, методика и результаты измерений на ИСЗ "Космос-936". Дифференциальный зарядовый спектр построен по результатам измерений 1915 треков, относящихся к ядрам с зарядом от 6 до 28 в интервале энергий $100-450 \text{ МэВ/нуклон}$. Измерения проводились за толщиной защиты $60 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$. В таблице I представлено относительное содержание элементов, нормированное к содержанию железа, в космических лучах. Наши данные получены в измерениях на севере США и Канады на высоте $20-40 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$ остаточной атмосферы. В диссертации показана правомерность такого сравнения. Некоторые различия обусловлены условиями и периодом измерений, однако в пределах погрешности $(0,05-0,20 - \text{ у различных авторов})$

Таблица I

Относительное содержание элементов

Диапазон энергий, МэВ/нукл.; цит. работа	Заряд ядра								
	20	21	22	23	24	25	26	27	28
200-400; /137/	0,37	0,23	0,51	0,16	0,66	0,61	I	-	-
150-400; /89/	0,41	0,21	0,43	0,12	0,42	0,34	I	-	-
350; /145/	-	-	-	-	0,42	0,60	I	0,25	0,18
100; /146/	0,17	0,18	0,24	0,17	0,38	0,55	I	0,25	0,09
100-450; данная работа	0,26	0,13	0,36	0,15	0,23	0,41	I	0,28	0,03

Таблица 2

Относительное содержание изотопов железа

Остаточная атмосфера, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$; цит. работа	Группа изотопов		
	(52+53)+54	(55+56)+57	58+(59+60)
1,8; /176/	$0,38 \pm 0,04$	$0,48 \pm 0,04$	$0,15 \pm 0,03$
2,0; /134/	$0,30 \pm 0,08$	$0,60 \pm 0,12$	$0,10 \pm 0,05$
3,0; /198/	$0,28 \pm 0,07$	$0,43 \pm 0,09$	$0,30 \pm 0,07$
ИСЗ "Космос-936", данная работа	$0,30 \pm 0,08$	$0,49 \pm 0,10$	$0,21 \pm 0,06$
Теоретическое предсказание	0,08	0,92	0,003

можно считать, что приведенные результаты, включая и наши, достаточно хорошо совпадают.

Разрешение метода идентификации, разработанного в третьей главе, продемонстрировано в диссертации на примере измерения на ИСЗ "Космос-936" соотношения групп различных изотопов железа в космических лучах. Полученный результат вместе с аналогичными данными других авторов представлен в таблице 2.

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ В КОСМИЧЕСКИХ РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Пятая глава посвящена разработке некоторых методических аспектов радиобиологических экспериментов "Биоблок" и краткому изложению результатов уже проведенных экспериментов такого типа. При этом мы в основном касаемся вопросов их радиационно-физического обеспечения.

Суть экспериментов типа "Биоблок" заключается в наличии детальной информации о частицах, поразивших биологические объекты. Это обеспечивается благодаря использованию трековых детекторов, размещенных в непосредственной близости от биообъектов. Применение детекторов позволяет:

- однозначно и с необходимой точностью определить объекты и область каждого объекта, через которые прошли тяжелые ядра с заданными параметрами (топическая регистрация);
- определить заряд, энергию и ЛПЭ прошедшей частицы в пределах пораженного объекта;
- установить корреляцию биологических эффектов с физическими параметрами частиц;
- исследовать действие прочих факторов космического полета на биологические объекты;
- получить данные о поле излучения в месте расположения экспериментального оборудования.

В диссертации рассмотрены общие вопросы планирования экспериментов типа "Биоблок" и классификация их в зависимости от объема необходимой радиационно-физической информации, сформулированы критерии выбора биообъектов и детекторов, описаны основные принципы конструктивного оформления экспериментов и некоторые конкретные технические решения. Существенным моментом при планировании эксперимента является выбор плотности размещения биообъектов в слоях-держателях. В предположении "одноударного" механизма поражения биообъектов в диссертации получено соотношение для оценки оптимальной плотности размещения биообъектов.

Получены соотношения, позволяющие по параметрам треков расчет-

ным путем определить пораженные биообъекты и координаты прохождения частиц через них. Приведены варианты для "ручных" и машинных расчетов. В заключении методического раздела дана схема полной обработки и анализа экспериментов.

Первый в СССР эксперимент типа "Биоблок" был проведен с нашим участием в 1973 году. С тех пор осуществлено 10 экспериментов на ИСЗ "Космос-613,690,782,936,1129", корабле "Союз-16", комплексах "Союз-20 - Салют-4" и "Союз-Аполлон". В процессе их проведения отработаны все основные методические и конструктивные элементы, доказана высокая эффективность такого рода экспериментов. Изучалось действие ТЗУ на семена, микроколонии клеток, культуру зоообразующего гриба и бактериофаг, яйца ракообразных, мозг мышей. В диссертации приведена сводная таблица, в которой отражены основные результаты и даны ссылки на публикации по каждому эксперименту. В заключении главы изложены соображения по дальнейшему совершенствованию космических радиобиологических экспериментов.

ВЫВОДЫ

Результаты, полученные в ходе выполнения настоящей диссертационной работы, позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Разработан метод идентификации тяжелых ядер по максимальной травимой длине трека в блоке ДТД. Расчетным и экспериментальным путем показано, что зарядово-массовое разрешение метода в диапазоне зарядов от 6 до 26 составляет 2-4%, что является достаточным для исследования даже изотопного состава ядер с зарядом более 22-24. При измерении спектров ядер в широком диапазоне энергий и зарядов разработанный метод не уступает по разрешению и информативности методам идентификации частиц по скорости травления вдоль трека.
2. В качестве детекторов могут быть использованы отечественные материалы - нитрат целлюлозы и лавсан. Отработан режим их химической обработки и проведены расчетно-экспериментальные исследования регистрационных характеристик. Показано, что детекторы сохраняют накопленную информацию о частицах в течение, по крайней мере, двух лет после экспонирования при параметрах среды в пределах, характерных для внутренних объемов космических кораблей.
3. Создана методика математической обработки результатов измерений в блоках ДТД, реализованная в комплексе программ "JAVA" на языке "Фортран-4".
4. Разработано и изготовлено оборудование для калибровочных облучений химической обработки и сканирования детекторов. Предложен и внедрен в практику метод многослойного сканирования и измерений треков в

- ДТД, повышающий производительность труда просмотрщиков в 6-8 раз.
5. Проведена серия измерений флешсов, плотности потока, зарядовых, энергетических и ЛПЭ-спектров тяжелых ядер космического излучения на орбитах искусственных спутников Земли, орбитальных пилотируемых станциях и в верхних слоях атмосферы.
6. Разработаны (в физической части) методические основы радиобиологических экспериментов по схеме "Биоблок" с топоческой регистрацией прохождения тяжелых ядер через биологические объекты. На основе разработанного метода подготовлены и проведены 10 радиобиологических экспериментов в космосе.
7. Предложены метод идентификации тяжелых ядер по разности выявляемых длин треков в блоке из чередующихся детекторов с различными порогами регистрации, способы и устройства для фиксации интервала времени регистрации частиц и конструкция слоя-держателя изолированных клеток. Совокупность этих методов и устройств может быть использована в последующих космических экспериментах для более полного извлечения информации и расширения круга исследуемых биологических объектов и тест-эффектов.

МАТЕРИАЛЫ, В КОТОРЫХ ОТРАЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ
ДИССЕРТАЦИИ

1. Генетические локальные эффекты космической радиации на бактериофаг ТЧВ⁺ (эксперимент "Зонообразующие грибки" - "Биоритм") - В кн.: "Успехи космической биофизики", Пушдино, ОНТИ ИЦБИ АН СССР, 1978, с.38-44. Авт.: С.С. Юров, И.А. Ливанова, Е.Н. Смирнова, В.А. Стаканов, А.М. Маренный, В.И. Попов, Г.С. Нечитайло.
2. Измерения потоков низкоэнергетичных ядер космического излучения на ИСЗ "Космос-690" и "Космос-782". - В кн.: "X симпозиум соц. стран по косм. биол. и мед.", тезисы, г. Сухуми, СССР, 1977, с.81-82. Авт.: Ю.А. Виноградов, А.М. Маренный, В.В. Цетлин, А.И. Хованская.
3. Измерение спектров линейных потерь энергии космического излучения на ИСЗ "Космос-782". - "Космические исследования", 1979, т.ХУП, №1, с.634-636. Авт.: Е.Е. Ковалев, В.Н. Брыксин, Ю.А. Виноградов, В.Е. Дудкин, С.Б. Козлова, А.М. Маренный, В.В. Маркелов, Н.А. Нефедов, Ю.В. Потапов, В.И. Редько, А.И. Хованская.
4. Маренный А.М. Регистрация тяжелых заряженных частиц в эксперименте "Биоблок" на ИСЗ "Космос-613". - В кн.: "XIII симпозиум по косм. биол. и мед. (тезисы докладов)", Интеркосмос, г. Варна, Болгария, 19-26 мая, 1975г., с.72-73.
5. Маренный А.М., Попов В.И., Солянов Б.И. Эксперимент "Биоблок-2".

- Сообщение I. Конструкция и состав сборки, методика топоческой регистрации и идентификации тяжелых ядер галактического космического излучения. - "Радиобиология", 1977, т.ХУП, с.59-61.
6. Мироньчева Л.Л., Маренный А.М. Метод просмотра многослойных блоков диалектрических трековых детекторов. - В кн.: "Актуальные проблемы космической биологии и медицины", ИМБП, М., 1977, с.78-79.
7. О возможном механизме регистрации следов ионизирующих частиц целлюлозными детекторами. - "Ж. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр.", 1972, т.17, №5, с.349-353. Авт.: Я.М. Веприк, А.Л. Картужанский, А.М. Маренный, В.И. Попов.
8. Hashegan D., Dudkin V.E., Mareny A.M. Charge and LET distributions of cosmic heavy ions measured on "Cosmos-690,782,936" - "Nuclear Tracks", 1980, v. 4, p. 27-33.
9. Hashegan D., Dudkin V.E., Mareny A.M. Heavy cosmic ions with charge Z=30-40 and there biological implications. - "Rev.Roum.Phys.", 1979, v. 24, N6, p. 529-538.
10. HZE particle radiation studies aboard Cosmos-782. - "Health Phys" 1978, v. 35, N5, p. 643-648. Auth.: Benton E.V., D.D.Peterson, A.M. Mareny, V.I.Popov.
11. LET variation measurements behind different absorber thicknesses on Cosmos-1129 satellite. - "Adv.Space Res.", 1981, v. 1, p.55-60. Auth.: D.Hashegan, M.Haiduc, A.Marin, E.E.Kovalev, G.P.Gertzen, S.A.Dashin and A.M.Mareny.
12. On the mechanism of cellulose films sensitivity to ionising particle tracks registration. - In "7^e colloque internat.de photogr.corpusculaire et des detect.visual solids", Barselone, 1970, v. 1, p.287-295. Auth.: Y.M.Vepric, A.L.Kartuzansky, A.M.Mareny, V.I.Popov.
13. Radiobiological experiment on the effect of heavy nuclei of cosmic radiation on board Cosmos-613. "COSPAR XYIII Plenary Meeting", 1975, Programm Abstracts. Sofia, Bulgar.Acad.Sci.Press, p. 342. Auth.: V.M.Abramova, V.N.Benevolensky, L.K.Vekshina, A.M.Mareny, B.I.Solyanov, V.I.Popov.
14. Radiobiological investigations in Cosmos-782 space flight (Bioblok SF1 experiment). - "Life Sci. and Space Res.", 1978, v. 16, p.137-142. Auth.: Yu.G.Grigoriev, H.Planet, M.Deploux, Y.Gauben-Blanquet, L.V.Nevsgodina, V.I.Popov, A.M.Mareny, Yu.A.Vinogradov, R.Pfhol, G.Gasset, B.Pianezzi, C.Jacquot.
15. Results of cosmic radiation bose field measurements aboard the "Salyut-6" orbital station. - Preprint KFKI-1980-35. Auth.: Yu.A.Akatov, T.V.Batenchuk, V.E.Dudkin, A.M.Mareny et al.

Рукопись поступила в издательский отдел

8 января 1982 года.