

ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТИЦ
КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИСЗ
«ИНТЕРКОСМОС-6»

Л. А. ВЕДЕШИН,
Р. А. НЫММИК,
И. Д. РАПОПОРТ,
А. Ф. ТИТЕНКОВ

По программе сотрудничества социалистических стран в области исследования и использования космического пространства в мирных целях 7 апреля 1972 г. в СССР был выведен на околоземную орбиту искусственный спутник Земли «Интеркосмос-6». Этот эксперимент, подготовленный учеными шести стран — Венгрии, Монголии, Польши, Румынии, Чехословакии и Советского Союза, — ставил задачей выяснение природы частиц космического излучения и исследование характеристик их взаимодействия с веществом в области высоких энергий (10^{12} — 10^{13} эв).

Необычайный по широте энергетический диапазон (до $\sim 10^{20}$ эв), богатство состава космических лучей весьма привлекательны для физики частиц высокой энергии, однако именно эти их особенности ставят перед исследователем значительные экспериментальные трудности, так как требуют достаточно тонких методов для селекции частиц по заряду, энергии и направлению движения, для регистрации актов ядерного взаимодействия и их продуктов. Эти методы должны обладать высоким пространственным разрешением, быть пригодными для использования в установках большой площади, рассчитанной на регистрацию потоков частиц высокой энергии. Сложные экспериментальные устройства, необходимые для таких исследований, отличаются большим весом и габаритами. Их вынесение за пределы атмосферы, поглощающей и трансформирующей первичные космические лучи, стало возможным только на определенном этапе развития ракетной техники.

Исследования частиц высокой энергии непосредственно в потоке первичного космического излучения были начаты на научных космических станциях «Протон» в 1965—1968 гг. Помимо задач астрофизического направления (выяснение состава и спектра излучения до энергий 10^{15} эв), в программу этих исследований входило изучение одной из наиболее важных ядерно-физических характеристик — зависимости сечения неупругого протон-протонного и протон-ядерного взаимодействий от энергии частиц.

Обнаруженный тогда рост неупругого сечения взаимодействия протонов при энергии, близкой к 10^{12} эв, получил убедительное подтверждение в недавно проведенных работах с использованием ускорителей на встречных пучках в Европейском центре ядерных исследований — ЦЕРНе. Факт возрастания сечения при этих энергиях имеет принципиальное значение, так как указывает на существование особенности в характере взаимодействия в области энергий $S^{\wedge}IO^2$ эв.

Эксперимент, поставленный на ИСЗ «Интеркосмос-6», сохранил преемственную программную связь с этими опытами. Однако здесь была предпринята попытка дальнейшего расширения изучения характеристик взаимодействия частиц космического излучения различной природы (протонов и более тяжелых ядер) с веществом при энергиях выше 10^{12} эв. Детализация касалась продуктов взаимодействия, исследования сводились к выяснению множественности и углового распределения возникающих в акте взаимодействия вторичных частиц, зависимости этих величин от энергии, а также их флуктуации в каждом отдельном случае регистрации первичной частицы определенной природы и энергии.

Эта более сложная задача привела к необходимости использовать в качестве основного экспериментального метода ядерные фотоэмульсии, обеспечивающие должное пространственное разрешение генерируемых в акте вторичных частиц. Главная трудность проведения исследований по данной методике связана с определением энергии первичных частиц. Польские физики предложили для этой цели прием, основанный на использовании нуклонов, которые возникают при развале тяжелых ядер космических лучей. Если подобный развал наблюдается в эмульсии, то кинематика процесса позволяет установить энергию зарегистрированного первичного ядра, а вместе с ним и энергию продуктов развала — нуклонов, последующие взаимодействия которых в эмульсии могут стать предметом изучения.

Этот метод, названный в данном эксперименте методом А, ограничивается исследованием только нуклонов и опирается на регистрацию тяжелых ядер высокой энергии, поток которых в космических лучах особенно мал. Поэтому экспериментаторы предусмотрели другой, свободный от указанных ограничений метод Б. Суть его состоит в сочетании двух столь разнородных способов измерения частиц высокой энергии, как фотоэмульсион-ая стопка в качестве регистратора ядерных взаимодействий первичной частицы и ионизационный калориметр (он был предложен в 1957 г. Н. Л. Григоровым) в качестве детектора ее энергии. Однако такое сочетание требует преодоления значительных технических трудностей. Если регистрация частиц и продуктов их взаимодействия производится в фотоэмульсии независимо от времени прихода частиц и разрешается только в пространстве, то для ионизационного калориметра доступна лишь временная селекция частиц. Связь между событиями, фиксируемыми одновременно в том и другом детекторе, может быть установлена лишь с помощью третьего, вспомогательного детектора, способного осуществить пространственно-временную регистрацию пришедшей частицы. Таким вспомогательным регистратором послужила искровая камера. Принципиальные основы метода Б в различных модификациях были разработаны еще в 1962 г. в Научно-исследовательском институте ядерной физики Московского университета.

На рис. 1 приведен внешний вид использованного в эксперименте на ИСЗ «Интеркосмос-6» прибора, на рис. 2 — его схематическое изображение (в двух проекциях). Прибор содержал следующие основные функциональные узлы. Стопка ядерной фотоэмульсии объемом около 45 л служила мишенью, с атомными ядрами которой происходили взаимодействия частиц, а также одновременно регистратором этих частиц и актов

их взаимодействий. Она была набрана из 805 слоев бесподложечной ядерной фотоэмульсии (размер каждого $600 \times 200 \text{ мм}^2$, толщина 450 мкм) и помещена в герметичный контейнер; в его нижней части, непосредственно под стопкой, располагались дополнительные горизонтальные фотоэмульсионные слои *B*, предназначенные для регистрации электронно-фотонных ливней, которые возникали в стопке в результате ядерных взаимодействий частиц высокой энергии.

Искровые камеры (ИСК-1 и ИСК-2) контролировали эмульсионную стопку со стороны прихода первичных частиц и со стороны выхода ливня

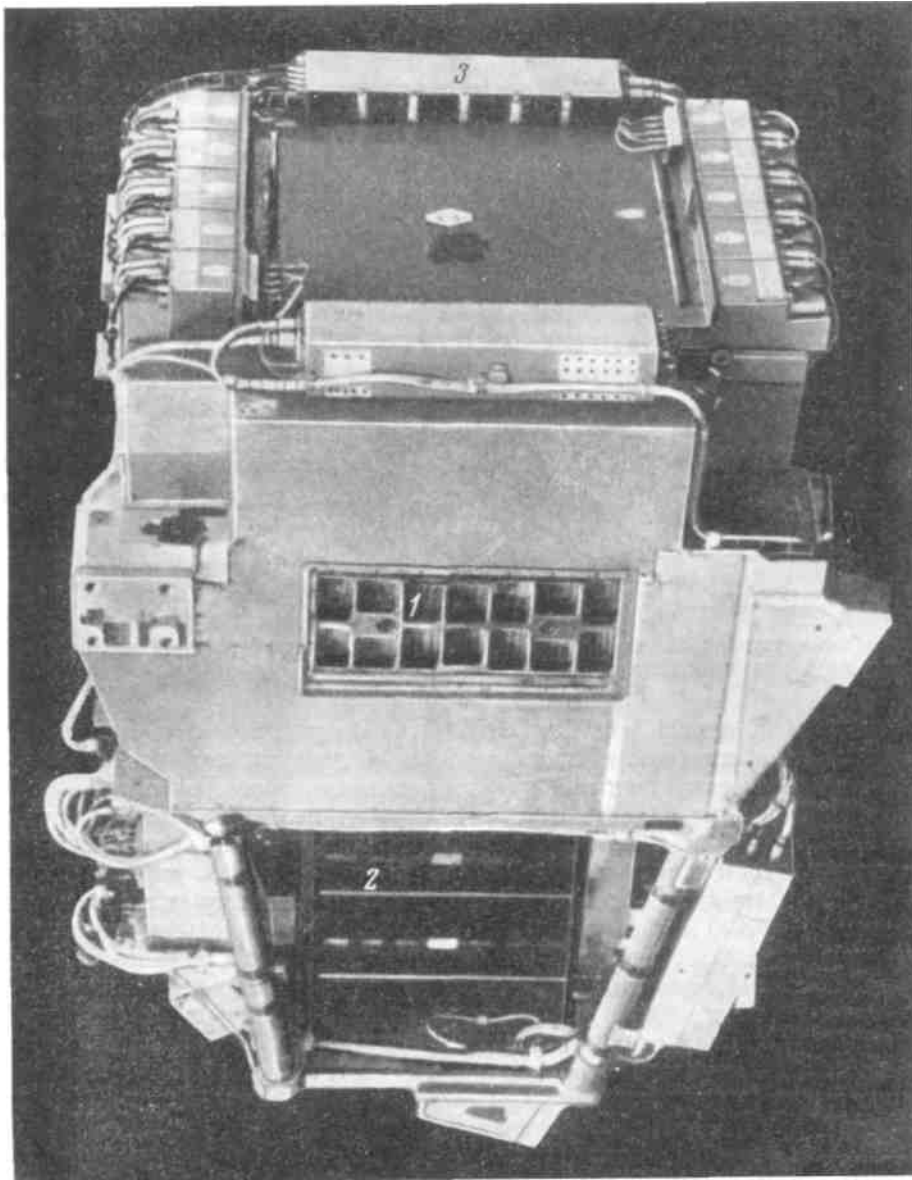


Рис. 1. Внешний вид установленного на ИСЗ «Интеркосмос-6» прибора для исследования первичного космического излучения

1 — фотоэмульсионный блок, 2 — ионизационный калориметр, 3 — детектор зарядов

вторичных частиц. Выполненные из стекла, они имели по два широких (по 90 мм) газоразрядных промежутка и обладали габаритами, достаточными для перекрытия эмульсионной стопки. Камеры, наполненные неоном до давления 0,8 атм, управлялись импульсами напряжением 35 кВ. Боковые стенки камер были снабжены координатными метками, на фоне которых осуществлялось стереофотографирование треков частиц с точностью локализации в пределах 1 мм.

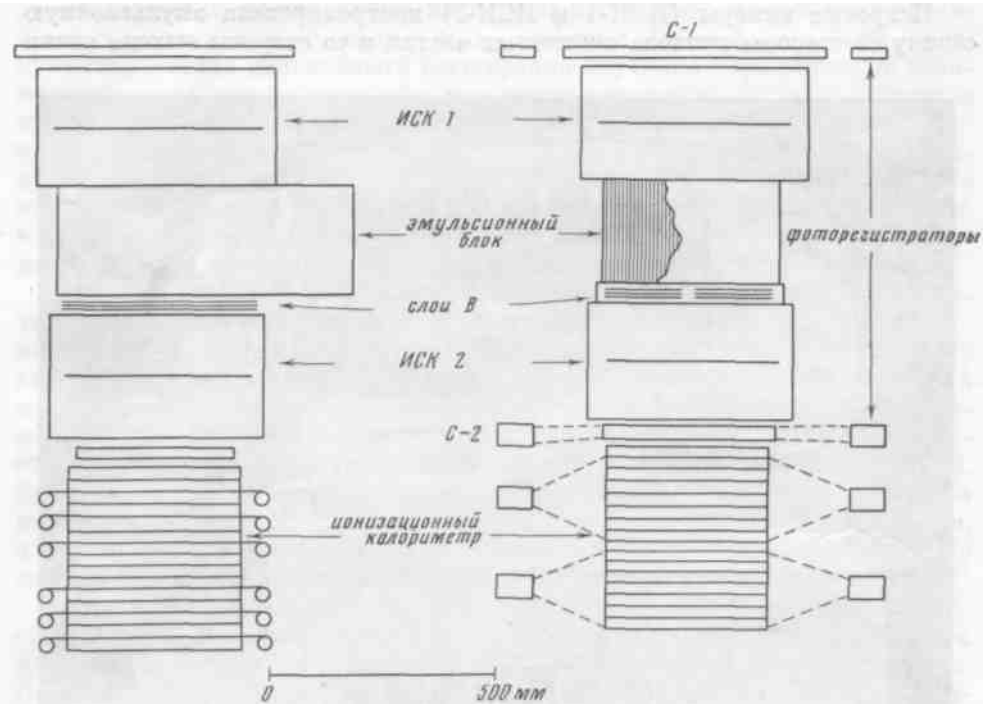


Рис. 2. Схема установленного на ИСЗ «Интеркосмос-6» прибора для исследования первичного космического излучения

Сцинтилляционный счетчик С-1 (рис. 3) располагался со стороны входного окна прибора. Он участвовал в управлении регистрацией, ограничивая телесный угол прибора, в пределах которого регистрировались первичные частицы. Вместе с тем он служил целям индикации заряда поступавших частиц. С помощью этого счетчика первичные частицы разделялись по трем зарядовым группам: протоны ($Z = 1$), альфа-частицы ($Z=2$), тяжелые ядра ($Z>2$). С-1 состоял из 10 автономных секций (размером $500 \times 50 \times 20$ мм³ каждая), что давало возможность осуществлять некоторое пространственное разрешение поступавших в него частиц. Вспомогательный сцинтилляционный счетчик С-2 также участвовал в управлении регистрацией частиц. Размещенный под фотоэмульсионной стопкой, он позволял отличать случаи образования ливня вторичных частиц от случаев прохождения первичных частиц без взаимодействия в стопке. Конструктивно счетчик С-2 был выполнен в виде двух автономных секций, что повышало его надежность.

Ионизационный калориметр находился в нижней части прибора. По условиям эксперимента был использован ионизационный калориметр ограниченной толщины: 15 поглощающих слоев свинца по 15 мм. В поглотителе такой толщины происходит выделение в среднем около 40% энергии первичной частицы, если она провзаимодействовала в эмульсионной

стопке. Поглощающие слои объединялись в две автономные секции, в каждой из которых ионизационный эффект контролировался с помощью четырех тонких (5 мм) пластических сцинтилляторов, размещенных между слоями. Под свинцовыми поглотителями были расположены также дополнительные детектирующие слои ядерной фотоэмульсии и рентгеновской пленки, рассчитанной на регистрацию электронно-фотонных ливней с энергией выше 10^{12} эв.

Электронными блоками управления регистрацией производилась селекция первичных частиц, обладающих достаточно высокой энергией (выше $1,5 \cdot 10^{12}$ эв) и приходящих в заданном телесном угле прибора, осуществлялась их регистрация по сигналам, поступающим с выхода сцин-тилляционных счетчиков С-1, С-2 и секций ионизационного калориметра. Для частиц меньших энергий предусматривались дополнительные внутренние команды, разрешавшие выборочную регистрацию этих частиц (с некоторым пересчетом) от энергии 10^9 эв. Наконец, существовала возможность глобальной регистрации частиц (независимо от направления прихода), если их энергия превосходила $5 \cdot 10^{13}$ эв. По команде регистрации на искровые камеры подавался высоковольтный управляющий импульс, фотографировались треки частиц, прошедших через искровые камеры, регистрировались энерговыделение в ионизационном калориметре и данные счетчика С-1 о природе первичной частицы, производилась кадровая протяжка подвижной рентгеновской пленки в калориметре.

Использование ядерных фотоэмульсий, рентгеновских пленок и других фотоматериалов обусловило ряд особенностей эксперимента, глав-

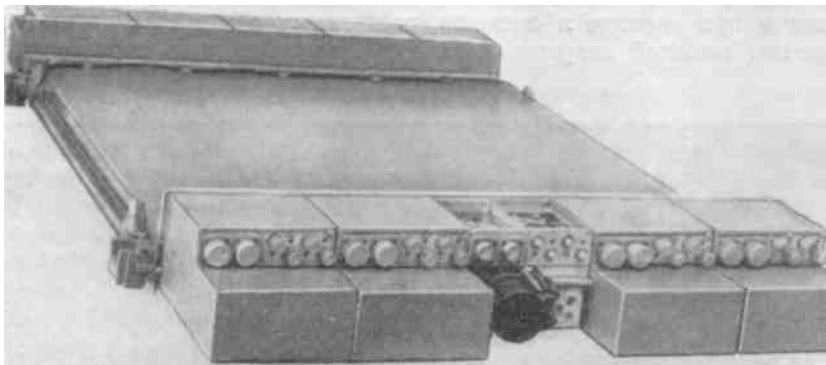


Рис. 3. Сцинтилляционный счетчик С-1

ной из которых был возврат этих материалов на Землю. Ядерная фотоэмульсия, естественно, допускает ограниченную экспозицию в космическом пространстве. Поэтому продолжительность эксперимента составила четверо суток. В соответствии с этим выбиралась и орбита спутника «Ин-теркосмос-6»: минимальное расстояние от Земли 203 км, максимальное — 254 км, наклонение к плоскости экватора 51,8 градуса.

Выполнение научной программы с учетом обоих принятых методов исследования требовало определенной оптимальной ориентации прибора на орбите относительно земной вертикали. Эта ориентация была выполнена вскоре после выхода спутника на орбиту. Во время орбитального полета с помощью команд, поданных с Земли, были изучены различные режимы работы аппаратуры и в конечном итоге установлен описанный

выше основной режим регистрации. Оперативный телеметрический контроль, осуществлявшийся в течение всего времени полета спутника, позволял следить за функционированием аппаратуры, темпом регистрации частиц. Температурные условия и влажность в рабочем контейнере все время поддерживались на заданном уровне.

После приземления аппаратуры все фотоматериалы были сняты с борта спутника и переданы для обработки. Эмульсионную стопку разобрали на отдельные слои, поверхность которых оптическим способом была покрыта координатной сеткой с размером клеток $1 \times 1 \text{ мм}^2$. Перед проявлением слои были наклеены на специальные фотостекла, предоставленные чехословацкими специалистами, а затем переданы для проявления в лабораторию высоких энергий Объединенного института ядерных исследований в Дубне.

Процесс проявления эмульсионного слоя толщиной 450 мкм занимает около 15 суток, проявление же всей стопки длилось около двух месяцев. Специалисты ряда социалистических стран, принимавшие участие в контроле качества проявленной фотоэмульсии, дали ей высокую оценку.

Входившие в состав эмульсионной стопки слои были малопригодны для работы под микроскопом из-за большого размера. Их нужно было разрезать на части, причем с точностью 100 мкм . Эта работа была проделана при помощи предоставленного польскими учеными специального станка, обеспечивающего необходимую точность резки.

Параллельно с этим начался отбор материала для научной обработки. Один из способов обнаружения ядерных взаимодействий частиц высокой энергии в эмульсионной стопке — поиск больших каскадов частиц, видимых невооруженным глазом. Такие каскады вызываются Λ -квантами, возникающими при распаде z^0 -мезонов, рожденных в ядерных взаимодействиях частиц высокой энергии (рис. 4). В эмульсионной стопке удалось

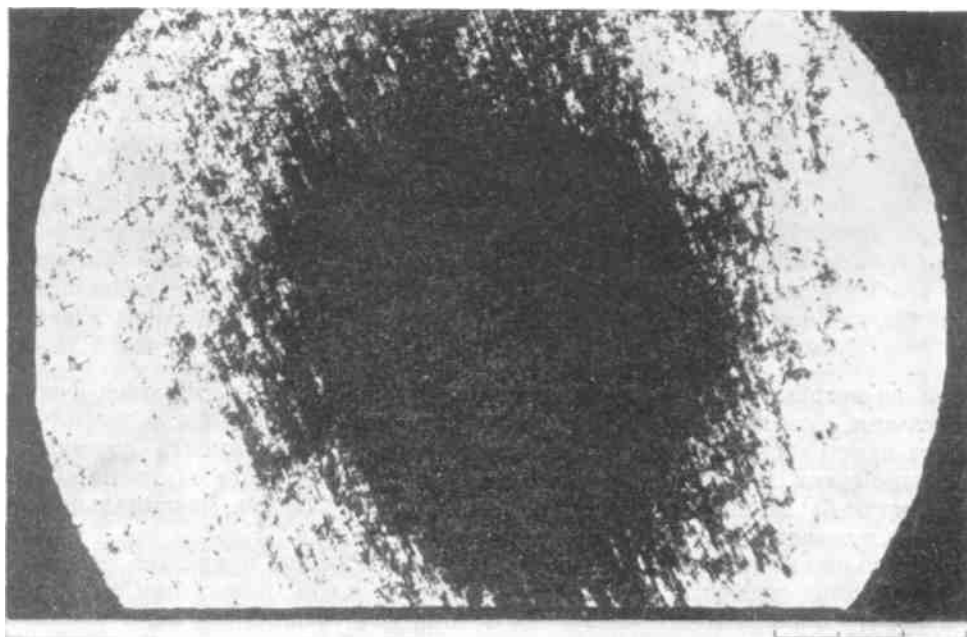


Рис. 4. Каскад заряженных частиц, вызванный в эмульсионной стопке частицей с энергией более 10^{15} эв

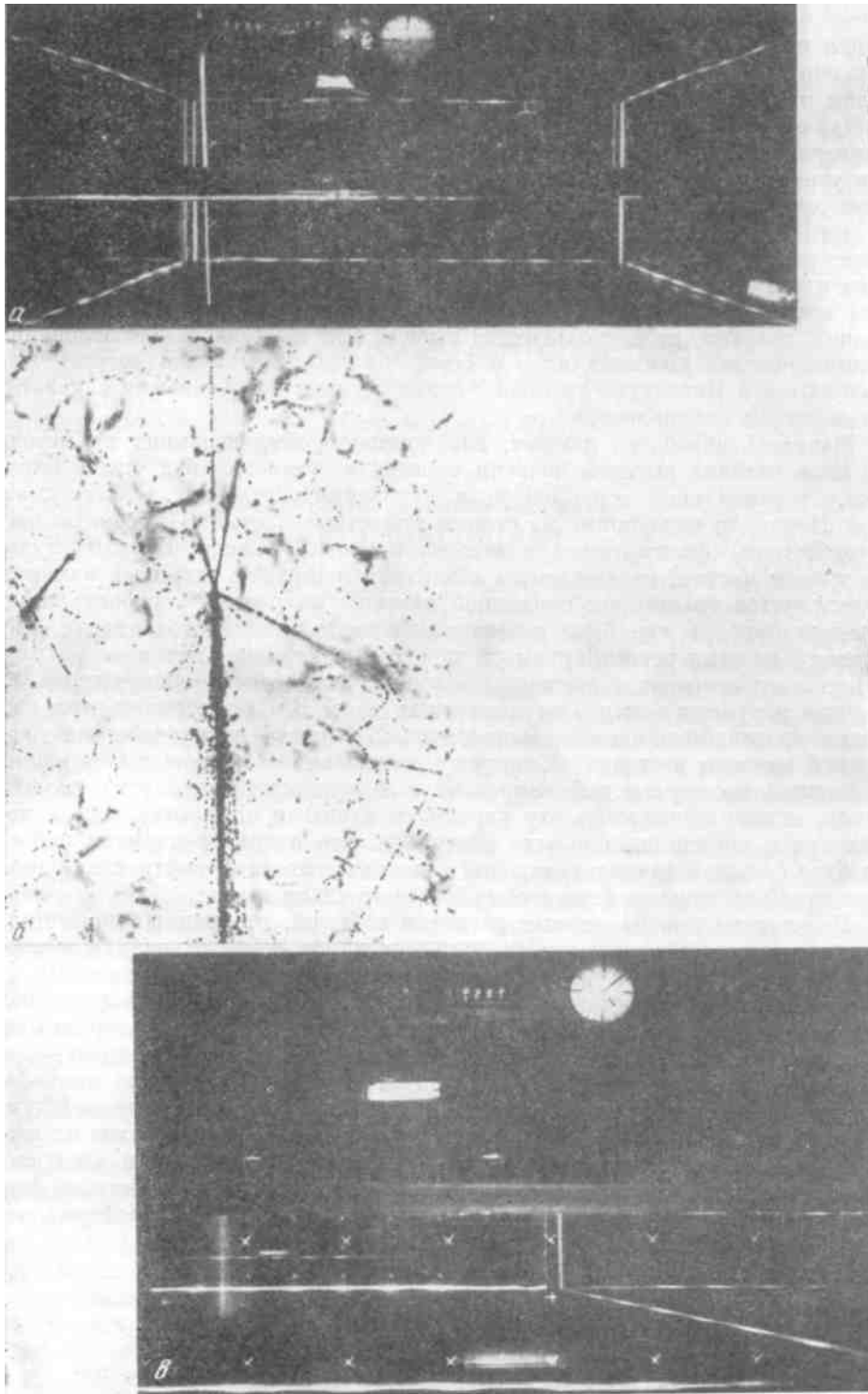


Рис. 5. Взаимодействие α -частицы с энергией $\sim 10^{13}$ эв в эмульсионной стопке
 а — вид трека первичной частицы в верхней искровой камере, б — микрофотографии взаимодействия первичной частицы в стопке, найденного по сигналам искровых камер, в — ливень вторичных частиц, зарегистрированный в нижней искровой камере

найти около 600 таких каскадов. Сейчас они прослеживаются под микроскопом к точкам их зарождения с целью обнаружения акта взаимодействия и трека первичной частицы. Эта работа проводится одновременно в Научно-исследовательском институте ядерной физики Московского университета, Институте атомной физики Румынской Академии и Институте ядерной физики Польской Академии наук, а также специалистами других стран — участниц эксперимента.

Еще одна возможность обнаружения взаимодействия ядер первичного космического излучения в эмульсионной стопке — прослеживание входящих в нее треков тяжелых ядер до точки их взаимодействия. Этим методом могут быть найдены взаимодействия тяжелых ядер самой разнообразной энергии, от нескольких до тысячи $Гэв$ на нуклон. Исследования взаимодействия тяжелых ядер в столь широком интервале энергий выполняются в Институте атомной физики Румынской Академии с участием советских специалистов.

Началась обработка данных, полученных в исследованиях по методу Б. Если частица высокой энергии пересекала установку под углом, близким к вертикальной оси прибора, и провзаимодействовала в эмульсионной стопке, то выходящие из стопки вторичные частицы (продукты взаимодействия) фиксируются в нижней искровой камере. В этом случае по трекам частиц, наблюдаемым в верхней и нижней искровых камерах, определяется траектория первичной частицы на разных горизонтальных уровнях прибора, где были размещены слои ядерной фотоэмульсии. Поскольку энергия регистрируемых частиц высока, ниже точки ее взаимодействия развиваются каскады, которые могут быть обнаружены поданным искровых камер в эмульсионных слоях В. Следы частиц этих каскадов прослеживаются под микроскопом до места взаимодействия первичной частицы в стопке. Обнаружив по указаниям искровых камер след первичной частицы и зафиксированную в эмульсии картину взаимодействия, можно сопоставить эту картину с данными ионизационного калориметра и сцинтилляционных счетчиков. Эта очень трудоемкая работа требует большой точности, так как в итоге необходимо найти след одной первичной частицы на фоне весьма большого числа других.

Результаты поиска первых десятков событий, отобранных по методу Б в соответствии с указаниями искровых камер, дают основание заключить, что практически все первичные частицы с энергией более 10^{12} эв сопровождаются вторичными каскадами, которые можно наблюдать под микроскопом. На рис. 5 приведен случай, когда в верхней искровой камере был обнаружен одиночный трек первичной частицы, в нижней — небольшой ливень вторичных частиц. Здесь же воспроизводится микрофотография обнаруженного в стопке по сигналам камер взаимодействия первичной а-частицы. Характеристики первичных частиц и актов их взаимодействия, наблюдаемых в стопке, согласуются с данными электронных детекторов, что свидетельствует о высокой эффективности и перспективности использования этого метода за пределами атмосферы.

Изучение материалов эксперимента продолжается.