

О. М. КОВРИЖНЫХ, Л. Г. МИЩЕНКО

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ СВОТТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНИЗАЦИОННОГО КАЛОРИМЕТРА, УСТАНОВЛЕННОГО НА ТЯЖЕЛОМ ИСКУССТВЕННОМ СПУТНИКЕ ЗЕМЛИ «ПРОТОН»

Описываются методика измерения световыхода пластических сцинтилляторов, примененных в ионизационном калориметре в качестве детекторов, и способ уравнивания светосбора от них на фотоумножители.

Многие важные задачи в области изучения первичных космических лучей и механизма взаимодействия частиц высокой энергии с веществом могут быть особенно успешно решены в экспериментах, поставленных за пределами атмосферы, на искусственных спутниках Земли. К числу таких задач можно отнести, во-первых, изучение абсолютного потока, энергетического спектра и химического состава первичного космического излучения при энергиях 10^{11} — 10^{14} эв и, во-вторых, исследование ядерных взаимодействий частиц в этой области энергий.

При решении этих задач необходимо знать энергию первичной частицы. Достаточно точные измерения ее при больших значениях (до $\sim 10^{14}$ эв) весьма трудны и в настоящее время единственным доступным средством для этого остается метод ионизационного калориметра, предложенный Н. Л. Григоровым с сотрудниками в 1954 г.

Поэтому в комплексе аппаратуры, предназначенном для изучения указанных вопросов, ионизационный калориметр является основным прибором. Такая аппаратура была разработана и создана НИИЯФ МГУ и АН СССР и работала на тяжелых искусственных спутниках Земли «Протон».

Одним из основных приборов научной космической станции «Протон» была установка СЭЗ-14, общий вид и схема которой показаны на рис. 1 и 2. Установка состоит из двух одинаковых детектирующих систем и двух расположенных над ними фильтров (2) из полиэтилена и из графита. Система фильтров может вращаться и каждая часть установки работает последовательно то с одним фильтром, то без фильтра, то с другим фильтром. Фильтры служат мишенями для первичных частиц и предназначены для изучения взаимодействия этих частиц с легкими ядрами (водорода и углерода), в частности для измерения эффективных сечений взаимодействия.

Основу каждой системы составляет ионизационный калориметр или детектор энергий, в котором в качестве поглотителя (4) используется железо, а в качестве детекторов ионизации — пластиковые сцинтилляторы (5) с фотоумножителями (7). Выбор вещества поглотителя и размеров ионизационного калориметра, а также минимального необходимого количества ионизационных детекторов определяется необходимостью иметь возможно более компактный прибор наименьшего веса, с достаточной светосилой, позволяющий с заданной точностью измерять энергию первичной частицы. В работе [1] подробно описан принцип ра-

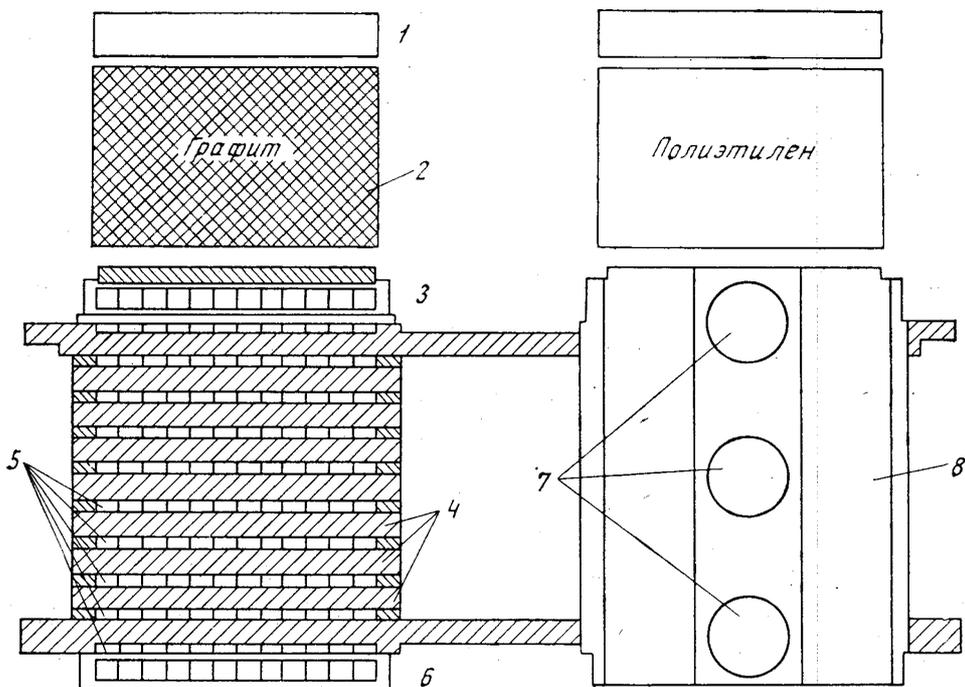


Рис. 1. Схема установки СЭЗ-14

боты прибора и обосновывается выбор железа в качестве вещества поглотителя. В работе [2] описана конструкция аналогичной установки — спектрометра полного поглощения для измерения энергии космических лучей в интервале энергий от нескольких Гэв до нескольких сотен Гэв.

В установке СЭЗ-14 кроме измерения энергии осуществляется также измерение заряда падающих частиц с помощью детекторов заряда — плоских двухслойных пропорциональных счетчиков (1), расположенных над фильтрами. Наличие или отсутствие взаимодействия прошедшей частицы с веществом фильтра устанавливается с помощью детекторов взаимодействий (3). Детектор взаимодействий представляет собой сцинтилляционный счетчик, над которым помещена свинцовая пластина толщиной 25 мм. Благодаря ей регистрируются и такие случаи взаимодействий, при которых в фильтре образовались только пи-ноль-мезоны (так как при прохождении свинца они дают ливень из заряженных частиц).

Работу установки в целом можно описать следующим образом. Первичная частица высокой энергии, упавшая на установку в пределах

ее рабочего телесного угла, пройдет последовательно счетчик — детектор заряда (1) и фильтр (2). Далее она (или ее «потомство») пересечет детектор взаимодействий (3) и в ионизационном калориметре (4, 5) растратит большую часть своей энергии, передав ее в результате взаимодействия с веществом поглотителя вторичным частицам. Вторичные частицы потратят свою энергию на ионизацию и некоторое число их выйдет с противоположной стороны установки через сцинтилляционный счетчик (6). Сцинтилляционный счетчик по своей конструкции не отличается от детектора взаимодействий, за исключением того, что над ним нет свинцовой пластины (7 — фотоумножители, 8 — диффузор).

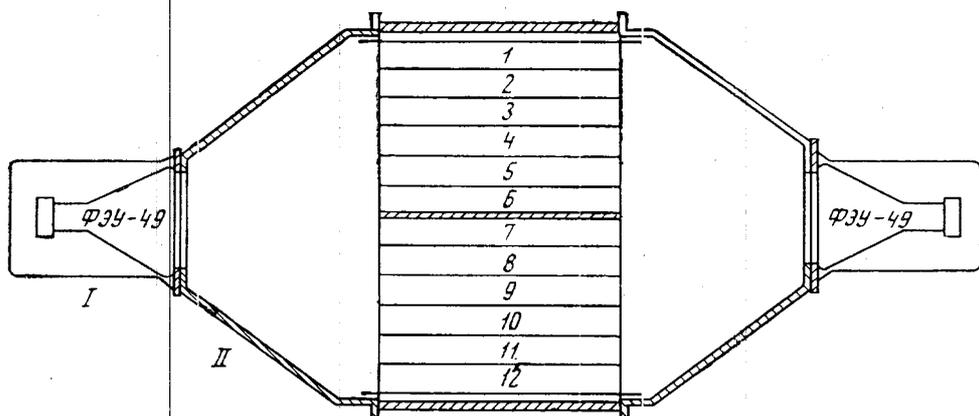


Рис. 2. Детектор взаимодействий (без верхней крышки). 1, 2..., 12 — пластиковые сцинтилляторы, I — фотоумножитель, II — диффузор

Регистрация физических процессов, происходящих в приборе, производится автоматически в случае совпадения во времени выходных импульсов от детектора заряда, детектора взаимодействий и сцинтилляционного счетчика. Порог регистрации детектора энергий выбран 10^{10} эв, а пороги детектора взаимодействий и сцинтилляционного счетчика соответствуют ионизации от одной релятивистской частицы.

Регистрируются следующие параметры: амплитуда импульса в пропорциональном счетчике — детекторе зарядов (для определения заряда частицы); амплитуда импульса в детекторе взаимодействий (с целью различения частиц, испытавших и не испытавших взаимодействия в фильтре); амплитуда импульса в детекторе энергии (для определения энергии падающей частицы).

Полученная информация с помощью телеметрии передается на Землю.

Ниже описывается методика исследования и подбора светотехнических параметров установки СЭЗ-14.

§ 1. Детектор взаимодействий

Как было сказано, детектор взаимодействий должен давать возможность различать случаи прохождения одной частицы, двух или нескольких частиц, т. е. случаи прохождения первичных протонов через фильтр без взаимодействия и с взаимодействием. Для этого необходимо, чтобы при прохождении одной частицы в детекторе взаимодействий

возникали световые вспышки с достаточно малым разбросом по интенсивности.

На рис. 3 изображен в плане детектор взаимодействий. Полированные пластины сцинтилляторов (полистирол с терфенилом + РОРОР) располагаются вплотную друг к другу. Большая часть света, возникающего в пластине сцинтиллятора при прохождении через нее заряженной частицы, испытывает полное внутреннее отражение на боковых гранях, выходит из нее через оба торца. Для частиц, прошедших через сцинтиллятор на разных расстояниях от его торца, количество света, выходящее через торец, будет неодинаковым из-за разной длины пути света (и, следовательно, его поглощения) в самом сцинтилляторе. Чтобы избежать связанной с этим ошибки торцевые поверхности пластин просматриваются с противоположных сторон двумя фотоумножителями (типа ФЭУ-49), показания которых суммируются. Свет от сцинтилля-

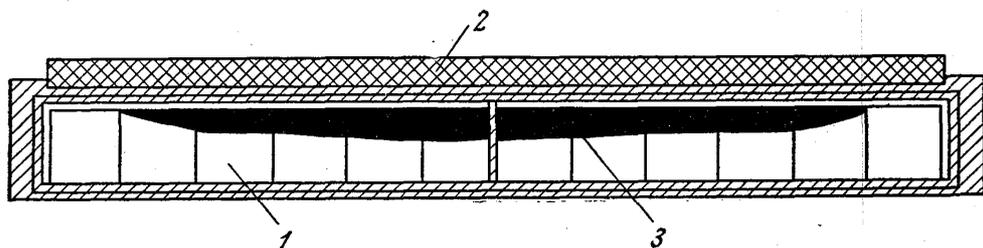


Рис. 3. Детектор взаимодействия. Вид со стороны фотоумножителя. 1 — сцинтилляторы, 2 — свинцовая пластина, 3 — уравнивающий светосбор «шторка»

торов собирается с помощью диффузоров, изнутри покрашенных белой эмалью (типа ВЛ-548). Условия светосбора неодинаковы для световых вспышек, возникающих в разных пластинах детектора взаимодействий. Так, при одинаковом количестве света, выходящем из торцевых поверхностей различных сцинтилляторов, на фотоумножитель от центральных пластин будет попадать больше света, чем от других. Для уравнивания этой неодинаковости светосбора торцы сцинтилляторов частично заклеивались «шторками» из черной светонепроницаемой бумаги¹.

Световыхходы сцинтилляторов были неодинаковы из-за некоторой разницы в составе пластмассы, поэтому были проведены измерения относительного световыхода всех сцинтилляторов. В качестве источника, возбуждающего свечение сцинтиллятора, использовался рентгеновский аппарат типа РУП-120-5 с трубкой 0,4 БПМ2-120. Поперечные размеры рентгеновского пучка были меньше ширины сцинтилляторов. Трубка была укреплена на тележке и могла автоматически перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях со скоростью 3 мм/сек. Под рентгеновской трубкой помещался ряд сцинтилляторов, разделенных друг от друга прокладками из черной бумаги. Ряд состоял из 11 измеряемых сцинтилляторов и одного реперного, эталонного, со световыходом которого сравнивались световыходы всех остальных.

Пучок рентгеновских лучей падал вертикально на сцинтиллятор на расстоянии ~ 100 мм от торца. Свечение сцинтиллятора измерялось с помощью фотоумножителя типа ФЭУ-52, который укреплялся на тележ-

¹ Первоначально светосбор от разных сцинтилляторов мы пытались уравнивать с помощью плексигласовых светопроводов с примерно одинаковым светопоглощением. Однако из-за сложности изготовления таких светопроводов было решено собирать свет на ФЭУ с помощью диффузоров (пренебрегая при этом некоторой потерей света).

ке рентгеновской трубки и перемещался вместе с нею. Расстояние плоскости фотокатода ФЭУ до торца сцинтиллятора выбиралось равным 5 мм, чтобы практически весь свет, выходящий из сцинтиллятора, попадал на фотокатод ФЭУ. Ось ФЭУ была параллельна осям сцинтилляторов и проходила через центр рентгеновского пучка. При движении рентгеновской трубки вместе с ФЭУ параллельно торцам сцинтилляторов ток ФЭУ менялся в зависимости от величины световыходов сцинтилляторов и проходил через минимумы при переходе границы между ними. Определение световыходов производилось по измерениям максимумов тока ФЭУ при прохождении каждого сцинтиллятора. Таким способом серия из 11 сцинтилляторов промерялась троекратно. Затем измерения повторялись при облучении серии с другой стороны, т. е. на расстоянии 100 мм от противоположных торцов пластин. Если в этих двух случаях световыход одного и того же сцинтиллятора оказывался одинаковым в пределах точности измерений ($\pm 5\%$), то сцинтиллятор считался однородным и отбирался для использования в детекторах. Величина его световыхода регистрировалась. В результате этих измерений оказалось, что световыходы отдельных однородных сцинтилляторов могут отличаться от среднего на $\pm 20\%$.

Из отобранных сцинтилляторов (с известным для каждого световыходом) комплектовались кассеты детекторов взаимодействия.

После этого для каждой кассеты находились размеры затемняющих шторок, выравнивающих количества света, поступающие от разных пластин на ФЭУ. Чтобы вычислить размеры шторок для первой кассеты, надо было замерить светосборы от каждой из ее пластин на ФЭУ, когда кассета и ФЭУ собраны со своим диффузором в рабочую систему детектора. Свечение в сцинтилляторах возбуждалось при этом также рентгеновским пучком.

С этой целью кассета в сборке с диффузором и ФЭУ помещалась под рентгеновской трубкой так, чтобы при движении трубки рентгеновский пучок перемещался параллельно торцам сцинтилляторов. Верхняя крышка кассеты снималась, а под кассету подкладывался 5-миллиметровый слой свинца, чтобы исключить свечение сцинтилляторов под действием идущего снизу рассеянного рентгеновского излучения. Такая экранировка уменьшала добавку от свечения соседних сцинтилляторов с 15 до 1,5%.

Проверка показала, что относительные результаты измерений сохраняются при движении рентгеновского луча на любом расстоянии от торцов сцинтилляторов. Для кассеты, составленной из сцинтилляторов с одинаковыми световыходами, светосбор от крайних сцинтилляторов примерно в 2,2 раза меньше, чем от центральных. Чтобы увеличить светосбор от крайних сцинтилляторов, по углам диффузоров были поставлены зеркала, благодаря которым светосбор с краев увеличился на 15%.

По результатам измерений светосбора в этих условиях для каждого сцинтиллятора первой кассеты рассчитывался размер необходимой для него шторки. Шторки изготавливались из черной светонепроницаемой бумаги и спиртовым раствором шеллака и наклеивались на торцы сцинтилляторов. Затем проводились контрольные измерения, чтобы добиться необходимой точности выравнивания светосбора (5%).

Для последующих кассет шторки изготавливались уже без предварительного промера светосбора. В каждом новом комплекте размер шторки для затемяемого сцинтиллятора получался из размера шторки сцинтиллятора на соответствующем месте в первой кассете умножением на отношение световыходов этих сцинтилляторов.

После наклейки шторок делались описанным способом контрольные промеры, которые показали, что светосбор от подавляющего числа сцинтилляторов одинаков с десятипроцентной точностью.

Затем была исследована зависимость светосбора в детекторе от положения места световой вспышки между торцами сцинтиллятора. Для этого измерялся ток ФЭУ-49 при облучении сцинтиллятора рентгеном на разных расстояниях от торца. Результаты показаны на рис. 4. Нижняя кривая (1) относится к измерениям, в которых сцинтиллятор изолировался от соседних черными прокладками. Средняя кривая (2) — результаты измерений для среднего сцинтиллятора в заполненной кассете детектора взаимодействия. Сравнение кривых (1) и (2) показывает, что кривая (2) идет более полого, чем кривая (1), так как часть

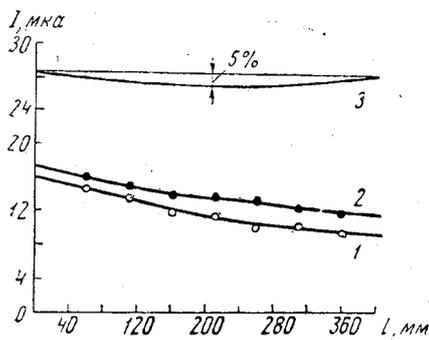


Рис. 4. Зависимость светосбора в детекторе взаимодействий от расстояния (1) места возникновения световой вспышки до торца сцинтиллятора

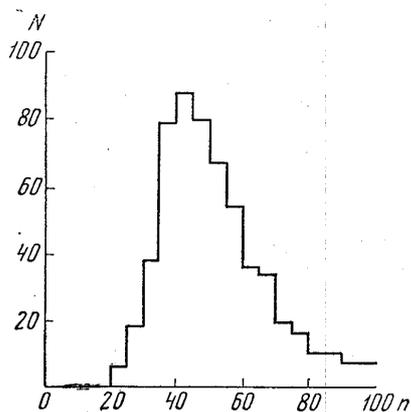


Рис. 5. Спектр импульсов от космических лучей, измеренный с помощью детектора взаимодействия

света выходит через боковые грани сцинтиллятора и попадает на ФЭУ, и это несколько компенсирует поглощение света в сцинтилляторе. Верхняя кривая (3) получена суммированием тока (2) от симметричных точек в сцинтилляторе. Она показывает зависимость амплитуды сигнала от места прохождения частицы, когда детектор взаимодействий просматривается с противоположных сторон двумя ФЭУ, сигналы от которых складываются. Неодинаковость суммарного сигнала из-за поглощения света вспышки внутри сцинтилляторов не превышает 5%. Если же боковые поверхности сцинтилляторов сделать матовыми (диффузное отражение), то, как показывают измерения, свет, приходящий из глубины пластины, ослабляется сильнее, чем в случае полированных граней (полное внутреннее отражение).

Роль отражающих свет внутренних поверхностей кассеты, с которыми соприкасаются сцинтилляторы, определялась следующим образом. Проводились измерения светосбора от сцинтилляторов в детекторе взаимодействий, когда сначала одна, а потом другая половина сцинтилляторов была покрыта сверху белой ватманской бумагой. (Поглощением рентгена в одном слое ватмана можно пренебречь.) При накрывании сцинтилляторов ватманом ток ФЭУ увеличивается на 5%.

После отработки рабочих качеств детектора взаимодействий на рентгеновской установке была проверена работоспособность устройства в реальных условиях, т. е. при регистрации космических частиц. Детектор взаимодействий помещался в гейгеровский телескоп из двух рядов

счетчиков, вырезающих телесный угол, равный телесному углу установки СЭЗ-14. Регистрация сцинтилляций от космических частиц осуществлялась с помощью двух ФЭУ-49, работавших на общую нагрузку. С помощью гасящих сопротивлений подбирались такие напряжения питания ФЭУ, чтобы чувствительности ФЭУ были одинаковыми. Измеренный спектр импульсов показан на рис. 5. По оси абсцисс отложен номер канала дифференциального анализатора, по оси ординат число импульсов в «окне» за время измерений. Величина выходного сигнала, соответствующего прохождению одной релятивистской частицы, согласовывалась с параметрами входа регистрирующей системы установки СЭЗ-14.

§ 2. Детектор энергий

Напомним, что ионизационный калориметр или детектор энергий представляет собой «стопку» из девяти 55-миллиметровых стальных плит общей толщиной 400 г/см^2 , между которыми помещаются десять рядов (по 12 штук в ряду) пластин полированных пластмассовых сцинтилляторов размерами $(15 \pm 0,5) \times (50 \pm 1) \times (410 \pm 2)$. Чтобы вспышка, регистрируемая фотоумножителями (ФЭУ-49), была пропорциональна энергии частицы, т. е. суммарной ионизации в сцинтилляторах, надо от одинаковых световых вспышек в разных местах калориметра на фотокатод ФЭУ получать одинаковое количество света. Как и в детекторе взаимодействий, уравнивание условий светосбора от всех 120 сцинтилляторов производилось с помощью черных бумажных шторок на торцах пластин.

Относительные измерения световых выходов сцинтилляторов проводились тем же способом, что и для детектора взаимодействий. Результаты измерений показывают, что световых выходы различных сцинтилляторов также могут заметно отличаться друг от друга (иногда в 1,5 раза). Для подготовки двух стопок детекторов энергий промерялся световых выход около 350 штук сцинтилляторов.

Измерение светосбора от каждого сцинтиллятора в детекторе энергий и подбор выравнивающих светосбор шторок проводились на рентгеновской установке с помощью деревянного макета детектора энергий. Макет представлял собой каркасную этажерку, в которую при измерениях на соответствующий этаж устанавливалась полка-кассета с определенным рядом сцинтилляторов. Со стороны ФЭУ внешний вид этажерки не отличался от настоящего детектора энергий: планки, разделяющие этажи, были покрашены белой краской ВЛ-548. Свет от сцинтилляторов собирался на фотоумножители с помощью диффузоров, идентичных с рабочими и имевших по краям, примыкающим к этажерке, зеркала шириной 30 мм. Макет ставился под рентгеновскую трубку так, чтобы при ее движении рентгеновский пучок перемещался параллельно торцам сцинтилляторов. Светосбор от каждого сцинтиллятора на фотокатод ФЭУ-49 измерялся тем же методом, что и для детектора взаимодействий. 1-й и 10-й ряды сцинтилляторов для измерений устанавливались в первом зорере, 2-й и 9-й — во втором, 3-й и 8-й — в третьем, 4-й и 7-й — в четвертом, 5-й и 6-й — в пятом зорере. В шестом зорере помещалась полка, выложенная свинцом толщиной 5 мм, чтобы измерения не искажались рассеянным рентгеновским излучением. Между измерениями разных рядов рентгеновская трубка и измерительная аппаратура выключались, поэтому кроме относительных измерений светосбора от сцинтилляторов в каждом ряду производились связующие измерения световых выходов реперного сцинтиллятора и части сцинтилляторов в кассете.

Светосбор от всех пластин в десяти кассетах выражался в процентах относительно светосбора этого реперного сцинтиллятора. Измерения показали, что для сцинтилляторов с одинаковым световыходом светосбор от угловых сцинтилляторов примерно в 3,5 раза меньше, чем от центральных. Зная световыход каждого сцинтиллятора и величину светосбора от него, можно вычислить таблицу размеров затеняющих шторок для случая, когда все сцинтилляторы в комплекте имеют одинаковый световыход. В дальнейшем с помощью этой таблицы по известным измеренным значениям световыходов сцинтилляторов делались шторки в последующих комплектах сцинтилляторов. После этого проводились контрольные измерения одинаковости светосбора в том же макете при облучении рентгеном. При этом оказалось, что удовлетворительным (меньше 10%) отклонением от среднего значения светосбора обладает 80% всех сцинтилляторов. Для остальных 20% проводилось исправление шторок.

Влияние места прохождения проникающего излучения через сцинтиллятор на амплитуду сигнала определялось измерением тока ФЭУ-49 при облучении рентгеном 1-го ряда сцинтилляторов на разных расстояниях от торцов. Результаты измерений показали, что когда детектор энергий просматривается двумя ФЭУ-49, сигналы от которых складываются; разброс амплитуд сигналов из-за поглощения света внутри сцинтилляторов находится в пределах $\pm 8\%$.

Выражаем благодарность Н. Л. Григорову и И. Д. Рапопорту за внимание и помощь в работе, а также ст. лаборанту Романовой О. А., лаборантам Заломаяеву В. И., Эйдельману Г. М., Андрееву Н. и старшему механику Элькину Ю. А., принимавшим участие в измерениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григоров Н. Л., Рапопорт И. Д., Савенко И. А., Скурдина Г. А. «Космические исследования», 2, вып. 5, 724, 1964.
2. Ramana Murthy P. V., Sreekantan B. V., Subramanian A., Verma S. D. Nuclear Instr. and Methods, 23, 245, 1963.

Поступила в редакцию
17. 6 1966 г.

НИИЯФ