

С 344, 1 л

T-35

120/1-71

P13-5391

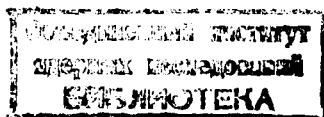
Г.М. Тер-Акопьян, М.П. Иванов, А.Г. Попеко,  
В.Г. Субботин, Б.В. Фефилов, Е.Д. Воробьев

**НЕЙТРОННЫЙ ДЕТЕКТОР  
ДЛЯ ПОИСКОВ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В ПРИРОДЕ**

P13-5391

Г.М. Тер-Акопьян, М.П. Иванов, А.Г. Попеко,  
В.Г. Субботин, Б.В. Фефилов, Е.Д. Воробьев

**НЕЙТРОННЫЙ ДЕТЕКТОР  
ДЛЯ ПОИСКОВ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В ПРИРОДЕ**



Вопрос о сверхтяжелых элементах в природе стал предметом экспериментальных исследований начиная с 1968 года. История этого вопроса изложена в /1/. За прошедшие два года появился ряд работ, посвященных поискам сверхтяжелых элементов в земных породах и космических лучах.

В /2,3,4/ сообщалось об обнаружении новой природной спонтанно делящейся активности, которая может быть связана с распадом тяжелых ядер с порядковым номером 110-114. Полученные результаты показывают, что если в природе существует хотя бы один элемент из предсказанной области относительной стабильности, то содержание его в земных породах невелико - не более  $10^{-10}$ - $10^{-12}$  весовых частей. Поэтому при поисках таких элементов большое значение имеет выбор методики, обладающей, по возможности, высокой чувствительностью и малым фоном.

Большинство поисковых работ основывалось на попытках обнаружить неизвестные ранее спонтанно делящиеся излучатели. Для наблюдения редких актов деления применялись либо трековые твердотельные детекторы /2,4/, либо большие пропорциональные счетчики /3/. Эти методики позволяют хорошо регистрировать осколки деления. Их предельная чувствительность определяется концентрацией урана в исследуемых образцах. Для большинства образцов с содержанием урана, близким к зем-

ному кларку ( $10^{-6}$  г/г), этот предел соответствует кажущемуся измеряемому периоду спонтанного деления тяжелых элементов (от платины до висмута)  $10^{22}$  лет. Кажущийся период спонтанного деления  $10^{22}$  лет получается, если данный образец содержит примесь неизвестного спонтанно делящегося элемента в количестве  $2 \cdot 10^{-14}$  г/г при периоде полураспада этого элемента  $2 \cdot 10^8$  лет.

Прайс и др. <sup>/5/</sup> изучали образцы с содержанием урана на три-четыре порядка меньшим кларка. Из-за малого содержания урана авторы наблюдали кажущийся период полураспада относительно спонтанного деления  $10^{25}$  лет. Однако столь чистые минералы должны быть в значительной степени обеднены любыми примесными элементами. Поэтому на самом деле выводы авторов <sup>/5/</sup> действительны лишь для тех минералов, которые ими были изучены. Заметим также, что применяя методику твердотельных трековых детекторов при анализе отдельных образцов древних минералов (как это сделано в <sup>/5/</sup>), следует осторожно оценивать предельную чувствительность этой методики, так как в процессе геологической истории минералов значительная часть следов осколков деления могла быть утеряна.

Перспективным методом поиска является активационный анализ (облучение быстрыми нейтронами) в сочетании с предварительным выделением ядер с массой  $\approx 300$  на электромагнитном масс-сепараторе. Чувствительность этого метода ( $10^{-14}$  г/г), развиваемого в различных лабораториях, должна быть несколько выше чувствительности метода регистрации осколков спонтанного деления ( $10^{-12}$  г/г) и не зависит от периода полураспада искомым изотопов. Существенное преимущество этой методики в том, что с ее помощью возможно непосредственно определять массовое число.

В <sup>/6/</sup> обсуждается вопрос о возможной связи со спонтанным делением сверхтяжелых элементов избыточного содержания тяжелых изото-

пов ксенона в некоторых метеоритах. В принципе, изучая аномалии в содержании изотопов ксенона в старых образцах (с возрастом более  $10^8$  лет), можно рассчитывать обнаружить примеси сверхтяжелых элементов в количестве до  $10^{-14}$  г/г. Однако метод поиска по ксеноновым аномалиям ("ксеномалиям") является косвенным. При оценке его чувствительности необходимо учесть возможную миграцию благородных газов. Кроме того, чувствительность этого метода может оказаться существенно ниже, если сверхтяжелые ядра предпочтительно делятся на три осколка.

Другие способы поиска сверхтяжелых элементов в природе (исследование слабых природных альфа-активностей, рентгеновская спектроскопия и т.д.) без предварительного химического обогащения обладают малой чувствительностью.

По-видимому, спонтанное деление должно быть распространенным видом радиоактивного распада изотопов в новой области стабильности. Если не сами долгоживущие нуклиды, то их дочерние продукты будут с большой вероятностью испытывать этот вид распада. Вместе с тем, постановка экспериментов по регистрации редких актов спонтанного деления значительно проще, чем метод масс-сепаратора в сочетании с активационным анализом и метод "ксеноманий". Поэтому поиск сверхтяжелых элементов путем наблюдения их спонтанного деления является, на наш взгляд, наиболее предпочтительным.

В настоящей работе описывается установка, позволяющая с высокой чувствительностью регистрировать мгновенные нейтроны, сопровождающие спонтанное деление, и предназначенная для поиска сверхтяжелых элементов. Первое сообщение о данной установке содержится в <sup>/1/</sup>. Известно, что с ростом порядкового номера трансурановых элементов среднее число ( $\bar{\nu}$ ) мгновенных нейтронов деления постепенно увеличивается от  $\bar{\nu} = 2$  для  $^{238}\text{U}$  до  $\bar{\nu} = 4,2$  для  $^{254}\text{Fm}$ . Экстраполя-

ция данных работы /7/, авторы которой измеряли среднее число нейтронов на акт деления компаунд-ядра  $^{260}_{102}$  (реакция  $^{238}\text{U} + ^{22}\text{Ne}$ ), показывает, что число  $\bar{\nu}$  для элементов с порядковыми номерами 110-114 должно быть больше пяти. В работе /8/ на основании вычислений с использованием жидкокапельной модели получено для деления медленными нейтронами изотопов  $^{293}_{110}$  и  $^{297}_{114}$   $\bar{\nu} = 10,6$  и  $\bar{\nu} = 10,5$ .

Если действительно в природе существует спонтанно делящийся изотоп с  $\bar{\nu} \geq 5$ , то при поисках его по нейтронам деления фон урана практически не опасен. Для этого достаточно регистрировать случаи, когда из данного образца испускается одновременно несколько (3,4 и т.д.) нейтронов. Большой пробег нейтронов позволяет изучать образцы весом до нескольких десятков килограммов, что существенно увеличивает эффективность поисковых работ.

Две хорошо разработанные методики регистрации нейтронов больше всего удовлетворяют требованиям поиска сверхтяжелых элементов. Первая из них - это детектор, основанный на регистрации замедленных нейтронов с помощью газовых счетчиков (например, счетчиков с  $\text{BF}_3$  /12/ или с  $^3\text{He}$  /13/). Вторая - счетчики с жидким сцинтиллятором, содержащим пропионат кадмия либо капроновокислый гадолиний. Сцинтилляционные установки обладают большой эффективностью регистрации нейтронов (60-90%), но они чрезвычайно чувствительны к  $\gamma$ -фону. Можно принимать специальные меры для подавления  $\gamma$ -фона (выбор конструктивных материалов, экранирование стен помещений, применение совпадений и антисовпадений). Однако эти меры вряд ли достаточно радикальны и в то же время они сильно усложняют эксплуатацию установки.

Эффективность детекторов с газонаполненными счетчиками не столь велика (20-40% для счетчиков с  $^3\text{He}$ ), однако, ввиду малой чувст-

вительности к  $\gamma$ -фону подобные детекторы очень удобны для поисковых работ. Нам представляется, что если число  $\bar{\nu}$  для сверхтяжелых элементов более 7, то предпочтительнее применение сцинтилляционной техники. Если же  $\bar{\nu} < 7$ , то более приемлема методика с газонаполненными счетчиками.

Нами был разработан нейтронный детектор, работающий по принципу регистрации замедленных нейтронов. Общий вид его представлен схематически на рис. 1. Детектор представлял собой цилиндрический объем, заполненный парафином. В центре парафинового блока имелась полость, в которую помещался контейнер с исследуемым веществом. Емкость контейнера - 5 литров. Вокруг контейнера находилось 12 пропорциональных счетчиков с  $^3\text{He}$ . Давление газа в счетчиках  $\approx 3$  атм. Рабочее напряжение на нити счетчиков 1350 в. Для того чтобы избежать редких микропробоев, которые могут возникать при повышенной влажности воздуха в помещении, поверхность проходных изоляторов обрабатывалась специальным составом. Кроме того счетчики, высоковольтные фильтры и разделительные конденсаторы помещались в герметический объем. На рис. 1 виден кожух, обеспечивающий герметизацию. Внутри герметического объема помещен влагопоглотитель. Высокое напряжение на все счетчики подавалось от одного источника питания. По выходному сигналу 12 счетчиков были объединены в шесть пар.

Для уменьшения фона от космических лучей над детектором помещалась система из гейгеровских счетчиков типа СИ-6Г, показанная на рис. 1.

Электронная аппаратура должна обеспечивать регистрацию нейтронов, возникающих в одном акте распада ядра. Временной интервал, забираемый группой импульсов от таких нейтронов, зависит от среднего времени жизни нейтронов в системе "образец-замедлитель-счетчики". Блок-схема электронной аппаратуры показана на рис. 2. Импульсы со

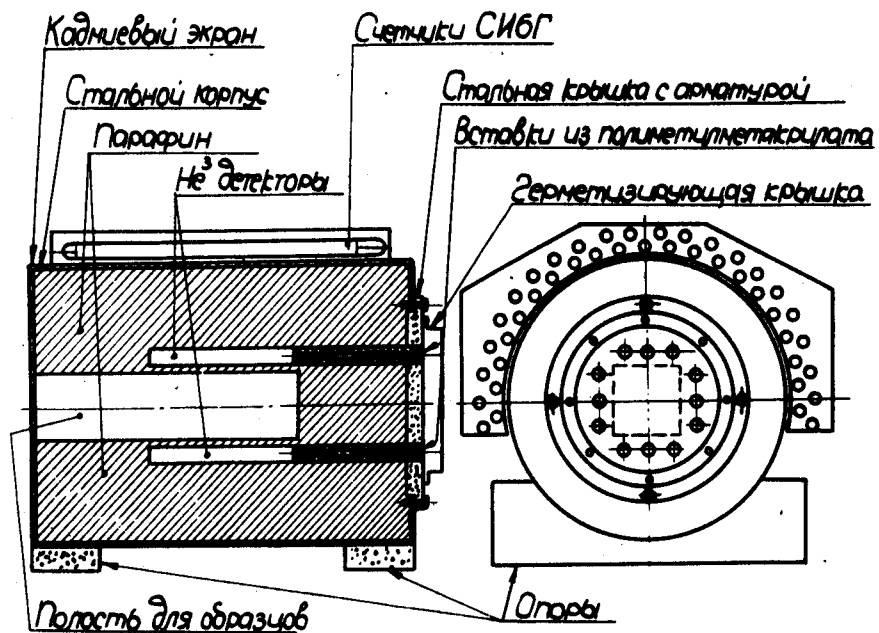


Рис. 1. Схема нейтронного детектора.

счетчиков поступали на 6 усилителей (У-1-6) и далее на вход 6 дискриминаторов (ОВ-1-6). Стандартные импульсы с выходов дискриминаторов подавались на смеситель (ИЛИ-1). Импульс со смесителя, проходя через нормально открытый ключ (НОК) и линию задержки (ЛЗ-2), запускал одновибратор ОВ-8, который вырабатывал импульс длительностью  $\tau = 100$  мксек, открывая на это время нормально закрытый ключ (НЗК). Если в течение времени  $\tau$  на вход схемы поступали новые импульсы, то они через (НЗК) проходили на пересчетную декаду (ПП). Информация на пересчетной декаде запоминалась на 2 сек (ОВ-10), за это время она поступала на преобразователь "код-аналог" (КА) и регистрировалась на ленте самописца. Для ограничения сверху амплитуды импульсов, поступавших на анализ, служил дискриминатор верхнего порога (ИЛИ-2, ОВ-7, ИЛИ-3, ОВ-9, НОК, см. рис. 2).

Электронная схема нечувствительна к группам импульсов, поступившим исключительно с какого-нибудь одного усилителя. Такие группы импульсов с выхода одного усилителя могут быть отнесены к фону, так как они вызываются с большой вероятностью либо пробоем по изолятору, либо двумя последовательными распадами дочерних продуктов урановых и ториевых загрязнений на внутренних стенках счетчиков.

Импульсы с гейгеровских счетчиков поступали на усилитель У-7, схему ИЛИ-3, ОВ-9 и блокировали работу нейтронного детектора на время  $T = 150$  мксек.

Вся электроника, за исключением части, относящейся к гейгеровским счетчикам, питалась от сухих элементов или аккумуляторов и была тщательно экранирована от внешних помех.

Калибровка детектора проводилась с помощью препаратов урана (350 г) и плутония-244 (4 мг). Эффективность регистрации одиночных нейтронов определялась по отношению числа зарегистрированных пар импульсов к числу зарегистрированных групп из трех импульсов как с

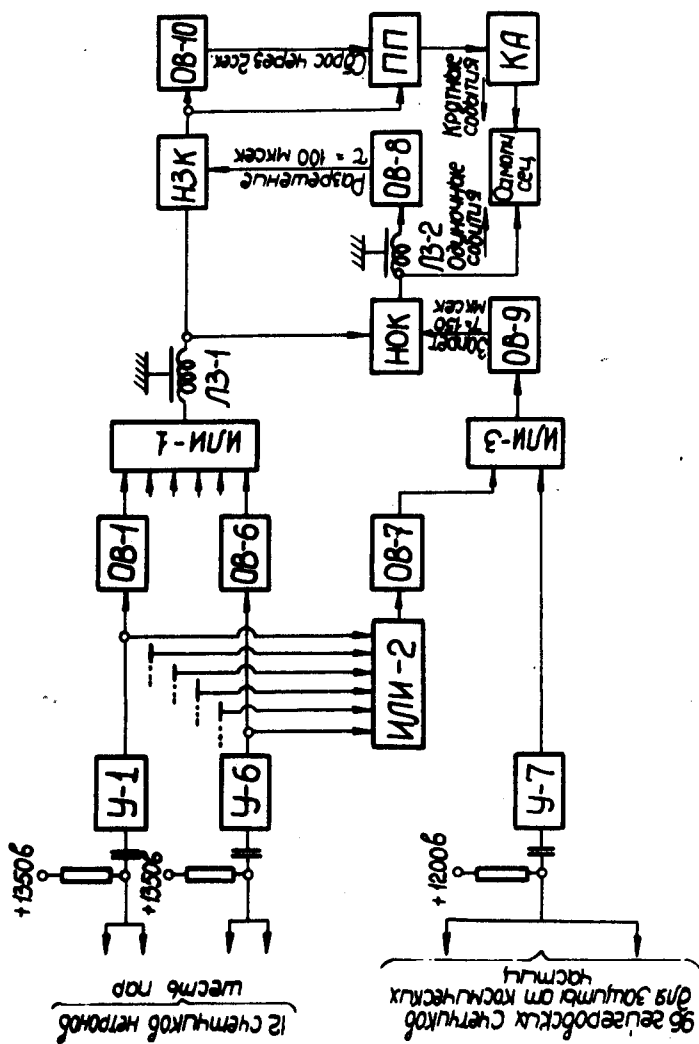


Рис. 2. Упрощенная блок-схема электронной аппаратуры.

урановым, так и с плутониевым препаратами. Для источника, расположенного в центре контейнера, эффективность была найдена равной 16%. На рис. 3 показана зависимость эффективности от положения источника вдоль оси детектора. Для проверки зависимости эффективности от средней энергии нейтронов внутрь контейнера помещался калиброванный Po-Be источник.

Большое внимание уделялось нейтронному фону, который создавался космическими лучами. Измерения проводились в защищенных помещениях. Вначале это была камера под слоем бетона толщиной, соответствующей 10 м в э<sup>х/</sup>, затем аппаратура была перенесена в шахту на глубину 40 м в э, а позже на 320 м в э<sup>хх/</sup>. На этих глубинах, в особенности на 40 и 320 м в э, практически отсутствует ядерноактивная компонента космических лучей, они представлены здесь только быстрыми мюонами. Однако фон нейтронов, хотя он и мал, должен быть учтен. При ядерных взаимодействиях быстрых мюонов испускается довольно большое число нейтронов<sup>9,10/</sup>. В таблице 1 приведены некоторые данные о генерации нейтронов мюонами на различных глубинах.

Данные о фоновых измерениях, проведенных нами на различных глубинах, представлены в таблице 2. В качестве образцов в контейнер помещались свинец, вольфрам, ртуть, алюминий и железо. Там же приводятся результаты измерений с пустым контейнером. Из табл.2 очевидно, что основным источником фона для данной установки служили ядерные взаимодействия космических частиц с веществом, содержащимся в контейнере. Материал самого детектора нейтронов и окружающие стены давали малый вклад в фон. На глубине 320 м в э этот вклад, х/Метр водного эквивалента.

хх/ Авторы благодарны Г.Б. Христиансену и Г.Т. Зацепину за любезное содействие в работе.

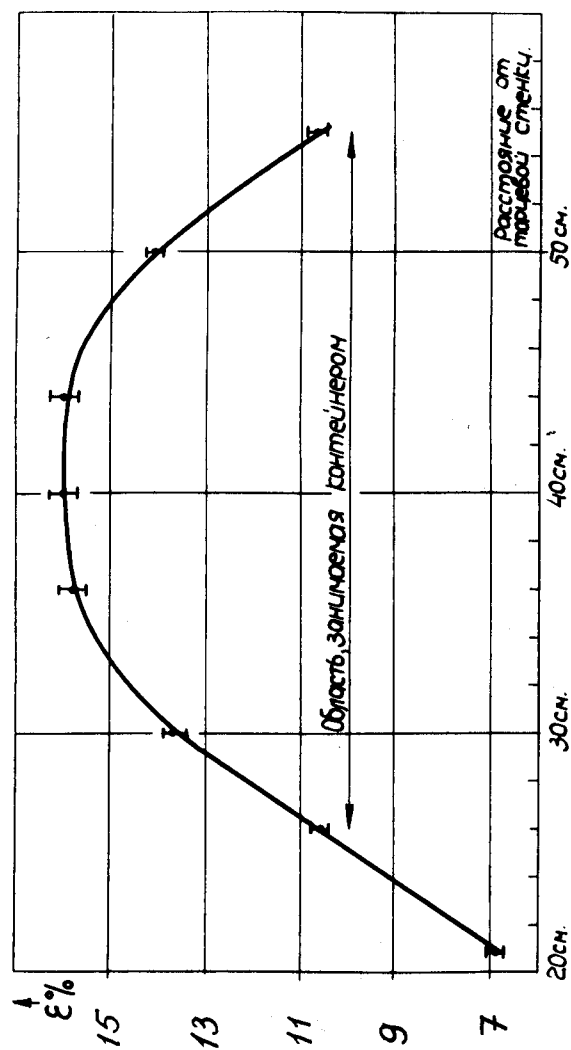


Рис. 3. Зависимость эффективности регистрации нейтронов ( $\epsilon$ ) от положения источника в полости детектора.

как видно, практически равен нулю. Счет одиночных импульсов на этой глубине составлял с пустым контейнером всего 20 отсчетов в час. По-видимому, этот счет был обусловлен, в основном, радиоактивными загрязнениями внутренней поверхности счетчиков <sup>/11/</sup>.

Для измерений на нейтронном детекторе были выбраны два образца: свинцовое стекло и свинцово-цинковая руда, в которых был ранее обнаружен неизвестный спонтанно делящийся излучатель <sup>/2,3/</sup>. Результаты этих измерений представлены в таблице 3. В этой же таблице показано, какое число двойных и тройных групп импульсов должно было зарегистрироваться при известной нам из <sup>/2,3/</sup> скорости спонтанного деления в данных образцах, если бы  $\bar{\nu}$  равнялось 10,5 и 3. Очевидно, что спонтанное деление данного излучателя сопровождается испусканием не более чем трех мгновенных нейтронов.

Полученный результат делает затруднительным идентификацию обнаруженного в работах <sup>/2,3,4/</sup> спонтанно делящегося излучателя как одного из изотопов сверхтяжелых элементов. Выяснение природы этого излучателя требует проведения дополнительных экспериментов. Однако нам представляется, что малость числа  $\bar{\nu}$  не позволяет полностью отвергнуть предположение о том, что наблюдавшееся спонтанное деление связано с распадом сверхтяжелых ядер. Некоторую ясность в вопрос может внести точное определение числа  $\bar{\nu}$ . Оценки показывают, что даже при  $\bar{\nu} \approx 2$  урановый фон не мешает измерению этой величины.

В настоящее время нами подготовлена установка, подобная описанной выше, однако с более совершенными счетчиками нейтронов. При вдвое большем объеме контейнера с образцом эффективность регистрации одиночных нейтронов в этой установке составляет 30%. При помещении ее в соляную шахту на глубину около 1100 м в э фон от космических мюонов здесь уменьшится по меньшей мере в десять раз (см. табл. 1).



Таблица 1

Глубина в метрах водного эквивалента	Средняя энергия мюонов (Гэв)	Интенсивность вертикальной компоненты мюонов $\text{см}^{-2} \text{сек}^{-1}$ стерад $^{-1}$	Среднее число мюонов, испускаемых ядром свинца при столкновении с мюоном	Полное число нейтронов, генерируемое мюонами в свинцовом образце весом 50 кг за 1 сек.
10	6	$1,3 \cdot 10^{-2}$	II	$4,9 \cdot 10^{-1}$
40	14	$1,7 \cdot 10^{-3}$	15	$6 \cdot 10^{-2}$
320	65	$2 \cdot 10^{-5}$	44	$2 \cdot 10^{-3}$
1100	162	$9 \cdot 10^{-7}$	94	$1,1 \cdot 10^{-4}$

14

Таблица 2

Глубина (м в э)	Название образца	Вес образца (кг)	Время измерения (часы)	Число зарегистрированных событий		
				два импульса в группе	Три импульса в группе	четыре импульса в группе
10	свинец	50	23	76	5	3
	вольфрам	26	30	54	2	0
	железо	30	10	10	0	0
	алюминий	II	29	6	0	0
	фон		33	3	1	0
40	свинец	50	29	13	2	2
	вольфрам	26	20	6	1	0
	железо	30	34	8	0	0
	алюминий	II	152	21	0	0
	фон		34	4	0	0
320	ртуть	35	283	10	3	1
	вольфрам	26	520	24	0	2
	алюминий	II	224	0	1	0

15

Таблица 3

Название образца	Вес образца кг	Продолжительность измерений (час)	Число зарегистрированных событий	Оценка фона космических лучей			Ожидаемое число событий							
				два импульса в группе (II)	три импульса в группе (III)	Итого	$\bar{N} = 10$		$\bar{N} = 5$		$\bar{N} = 3$			
				II	III		II	III	II	III	II	III	II	III
Свинцовое стекло	16	968	12	10±2	2,0±2		14	0-I	3	8	6	0		
Галенит	7,4	151	0	-	-		14	I-2	7	0	3	0		

Такая аппаратура с успехом может быть применена в поисковой работе для широкого круга руд и продуктов химической переработки. Предельная чувствительность оказывается при этом значительно выше, чем при прямой регистрации осколков деления. Например, если  $\bar{v} = 10$ , то предельная чувствительность соответствует кажущемуся полупериоду спонтанного деления  $10^{24}$  лет, при  $\bar{v} = 5$  пределом является  $5 \cdot 10^{23}$  лет. Такая чувствительность достигается в результате измерений, продолжающихся не более десяти суток.

В заключение авторы выражают искреннюю признательность академику Г.Н. Флерову за предложение данной темы и постоянное руководство работой. Г.Н. Смиреникина и Л.И. Прохорову авторы благодарят за многие ценные советы и за предоставление счетчиков, М.С. Бирулева и А.В. Михушкина авторы благодарят за помощь в наладке электронной схемы.

## Л и т е р а т у р а

1. Г.Н. Флеров, С.А. Карамян. Доклад на Международном Менделеевском конгрессе в Турине (Италия, сентябрь 1969). Препринт ОИЯИ Р6-4902, Дубна, 1970.
2. Г.Н. Флеров, В.П. Перелыгин. Препринт ОИЯИ Д7-4205, Дубна, 1969.
3. Г.Н. Флеров, Н.К. Скобелев, Г.М. Тер-Акопян, В.Г. Субботин, Б.А. Гвоздев, М.П. Иванов. Препринт ОИЯИ Д6-4554, Дубна, 1969.
4. Э. Цесляк. Препринт ОИЯИ Р15-4738, Дубна, 1969.
5. P.V. Price, P.L. Fleischer and R.T. Woods. General Electric, Research and Development centre, Report No 70-C-070 Febr., 1970.
6. M. Dakowski. Earth and Planetary Science Letters, 6, 152 (1969).

7. С.А. Карамян, Ю.Ц. Оганесян, К.И. Шарифов. Ядерная физика 11, 304 (1970).
8. J.R. Nix. Preprint LaLA-DC-10530, May 12, 1969.
9. O.G. Ryajskaya and G.T. Zatsepin. Proc. of the Ninth International Conf. on Cosmic Rays. London, Sept.1965, vol.2, p. 987.
10. G. Cocconi, V. Cocconi-Tongiorgi. Phys.Rev., 82, 335 (1951).
11. И.Р. Барабанов, В.Б. Вешников, А.А. Поманский. АЭ 26, 289 (1969).
12. Eizo Teranishi, Bunji Furubayashi, Taichi Michikawa, Misao Kageyama and SOsamu Yura. Japanese Journal of Applied Physics, 1, 36 (1964).
13. L.V. East and R.B. Walton. Nucl.Instr. and Meth., 72, 161 (1969).

Рукопись поступила в издательский отдел  
2 октября 1970 года.