

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДЫ ИЗЛОМА СПЕКТРА ПЕРВИЧНОГО КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗНОСТНЫМ МЕТОДОМ

В. П. Павлюченко и коллаборация ГАММА

(Р. М. Мартиросов, Н. М. Никольская, А. Д. Ерлыкин, О. А. Бабаян,
Г. С. Варданян, А. П. Гаряка, Л. В. Джонс,
Я. Кемпа, Б. Паттисон, Ж. Прокурор)

Приводятся предварительные экспериментальные результаты проверки работоспособности разностного метода для определения природы излома (колена) в энергетическом спектре первичного космического излучения. Получено статистически обеспеченное указание на существование близкого источника в Южном полушарии неба.

Ключевые слова: космические лучи, излом первичного спектра, диффузионный перенос, эксперимент, разностный метод, близкий источник.

Введение. Энергетический спектр первичного космического излучения (ПКИ) хорошо описывается степенным законом с показателем 2.7 вплоть до энергии $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ, после которой этот показатель быстро возрастает до 3.1 (колена). Проблема колена в силу своей важности вызывает споры о своей природе в течение более 50 лет с момента открытия [1]. Несмотря на множество попыток объяснить причину его возникновения, до сих пор ни одна не получила надежного экспериментального подтверждения. Это, в первую очередь, связано с тем, что получение прямых экспериментальных доказательств затруднено из-за искривления траекторий заряженных частиц хаотическими и регулярными магнитными полями при их движении в Галактике. Распространение частиц ПКИ в крупном масштабе ближе к броуновскому, которое можно рассматривать как диффузионный перенос.

В настоящее время имеются три основные астрофизические модели, пытающиеся объяснить поведение ПКИ в этой области энергий:

– диффузионная [2], в которой колено возникает из-за увеличивающегося вытекания частиц из Галактики с ростом энергии. Так как при равных энергиях тяжелые ядра в магнитных полях отклоняются сильнее, чем легкие, то первыми из Галактики уходят протоны, а затем все более тяжелые ядра;

– модель предельной энергии [3], до которой могут ускоряться протоны в оболочках сверхновых звезд в Галактике;

– модель близкого источника [4], частицы которого накладываются на гладкий общегалактический спектр, создавая избыток в области колена и имитируя излом спектра.

Установка ГАММА. Настоящая попытка исследовать природу излома, основанная на использовании именно диффузного характера распространения ПКИ в Галактике, проводилась с помощью полученных в течение последних трех лет экспериментальных данных установки ГАММА. Установка расположена на южных склонах г. Арагац в Армении на высоте 3200 м над уровнем моря (700 г/см^2) с географическими координатами центра установки $40^\circ 28' 12''$ с.ш., $44^\circ 10' 56''$ в.д. Установка регистрирует широкие атмосферные ливни (ШАЛ) в интервале энергий $10^{14} - 10^{17}$ эВ с помощью системы наземных и подземных детекторов заряженных частиц. Подробное описание установки, ее технические характеристики и основные результаты приведены в [5–7, 14].

Для настоящего анализа отбирались ШАЛ с числом заряженных частиц $N_e > 10^5$, с зенитными углами $\theta < 40^\circ$ в лабораторной системе координат и с осями в радиусе $R < 60$ м от центра установки. Полное число событий 3.38 млн. при живом времени 11544 часа.

В каждом событии при первичной обработке вычислялись следующие характеристики ШАЛ:

- координаты оси X , Y относительно центра установки;
- зенитный и азимутальный углы θ , φ в лабораторной системе координат;
- мощность ливня N_e и число мюонов в нем N_μ ;
- так называемый “поперечный” возраст ливня S , вычисленный из функции пространственного распределения в аппроксимации Нишимуры–Каматы–Грейзена (НКГ);
- первичная энергия E_0 , вычисленная по методу [6] с использованием N_e , N_μ , S , θ ;
- время прихода ШАЛ по Гринвичу.

Угловые координаты (θ, φ) прихода каждого ШАЛ в лабораторной системе координат пересчитывались в горизонтальные астрономические координаты (ξ, h) следующим образом: $h = 90^\circ - \theta$ (вместо зенитного угла используется высота над горизонтом h) и $\xi = 286^\circ - \varphi$, так как направление “Север” в лабораторной системе повернуто на 16° к

востоку относительно истинного Севера [15], и отсчет углов φ шел от “Востока” против часовой стрелки, а в горизонтальной астрономической системе отсчет ξ идет от Юга по часовой стрелке. Из горизонтальной астрономической системы по стандартным формулам с использованием географических координат установки и времени прихода ШАЛ вычислялось направление прихода (α – прямое восхождение, δ – склонение) каждого ШАЛ в экваториальной системе координат для эпохи J2000. Дополнительно экваториальные координаты каждого ШАЛ пересчитывались в галактические (l – долгота, b – широта). Контроль пересчетов проверялся с помощью астрономических утилит [8]. Итоговая ошибка пересчета от лабораторной системы в галактическую составила не более 10 угловых минут для интервала 1960–2060 годы.

Метод анализа экспериментальных данных основан на двух естественных предположениях:

1. По данным многих экспериментов [9] изотропия прихода ШАЛ с первичной энергией $10^{14} - 10^{16}$ эВ выполняется с точностью не хуже одного процента, что обеспечивается наличием многих источников и крупномасштабным диффузным переносом заряженных частиц от источников до Земли. Предполагается, что в таких условиях при достаточно большом числе зарегистрированных событий и не очень больших расстояниях от источника до Земли его вклад в общее число зарегистрированных ШАЛ из-за диффузии будет плавно уменьшаться с увеличением угла между направлением на источник и направлением прихода частиц. Максимальный вклад вносится со стороны источника, а минимальный – с обратного направления. С ростом расстояния до источника угловое распределение приходящих заряженных частиц будет расширяться вплоть до изотропного, когда разность вкладов со стороны источника и с обратной стороны становится неразличимой (область чувствительности метода). Это же предположение относится и к другим характеристикам ПКИ, зависящим от углов рассеяния (например, к массовому составу).

2. Предполагается, что установка при фиксированных триггерных условиях работает с одинаковой светосилой независимо от времени суток и времени года, что обеспечивает одинаковые условия наблюдения разных направлений при вращении Земли. Это обычное требование для стабильной работы экспериментальной установки.

В работе [10] был предложен разностный метод для проверки моделей излома (колена) при энергии $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ. Разностный, точнее диффузионно-разностный, метод анализа экспериментальных данных, предполагающий диффузный характер распространения ПКИ в Галактике, состоит в следующем. Вся небесная сфера в галактических

координатах разбивается на две части: одна в заданном для исследования направлении (l_0, b_0) , а другая – в противоположном $(l_0 - 180^\circ, -b_0)$, и характеристики ШАЛ, пришедших из них, сравниваются между собой. Для этого в обоих наборах событий строятся распределения выбранных для анализа экспериментальных параметров или их комбинаций, и эти распределения, после приведения их к одинаковым условиям, вычитаются друг из друга.

Приведение к одинаковым условиям означает введение одинаковых границ интервалов в обоих распределениях и выбор такого угла ψ_0 (или $H_0 = \cos \psi_0$) раствора шарового конуса вокруг направления (l_0, b_0) , чтобы число событий n и n^{anti} в обоих наборах было одинаковым, причем события при $H \geq H_0$ – приходят с заданного направления, а при $H < H_0$ – с противоположного. Здесь для ливня с углами (l, b)

$$H = \cos \psi = \sin b_0 \sin b + \cos b_0 \cos b \cos(l - l_0).$$

Учитывая предположения 1 и 2, можно утверждать, что при $n = n^{\text{anti}}$ время обзора двух частей сферы наблюдений будет одинаковым, никаких дополнительных проверок условий эффективности регистрации событий не требуется. В разностном методе автоматически вычитается общий фон и возможные методические ошибки, т.к. они одни и те же в обоих наборах. Ошибка при отнесении ШАЛ к неправильному набору на границе раздела из-за ошибок в углах практически не имеет значения, так как характеристики ШАЛ близки при близких углах прихода, и они вычитаются как общий фон.

Численным параметром отличия распределений является величина χ^2/J , где $\chi^2 = \sum_i (\Delta_i/\sigma_i)^2$, а J – число степеней свободы. Разность между распределениями в интервале i равна $\Delta_i = m_i - m_i^{\text{anti}}$, а среднеквадратичная ошибка этой разности вычисляется из распределения Пуассона

$$\sigma_i = \sqrt{m_i + m_i^{\text{anti}} + 1} = \sqrt{n_i + 1},$$

где m_i – число событий с заданного направления в интервале i , а n_i – полное число событий в интервале i по всей сфере наблюдений, оно не зависит от заданных углов (l_0, b_0) . Такая независимость σ_i очень важна для сравнения значений χ^2/J между собой при сканировании небесной сферы в поисках максимума χ^2/J , т.е. поиска направления с максимальным отличием распределений в заданном и противоположном ему направлениях.

Равенство $n = n^{\text{anti}}$ позволяет на установке с ограниченным сектором обзора исследовать всю небесную сферу в пределах чувствительности метода, т.к. величины χ^2/J

для направления (l_0, b_0) и противоположного ему равны, поскольку величины σ_i и $|\Delta_i|$ поинтервально равны. Меняется только знак Δ_i .

Экспериментальные результаты. В качестве экспериментального параметра был взят возраст S – формальный параметр, получаемый подгонкой функции пространственного распределения данного ливня в аппроксимации НКГ к показаниям детекторов, из-за его минимальной зависимости от первичной энергии и углов прихода в лабораторной системе координат.

Это не чистый возраст продольного развития электромагнитного каскада, который вычисляется в каскадной теории, но линейно коррелирован с ним. Он тоже мал в начале развития ШАЛ, в максимуме он приблизительно равен 1 и далее растет с глубиной. Распределение числа ливней по S в линейном масштабе имеет вид колокола вокруг среднего значения. С ним удобно работать.

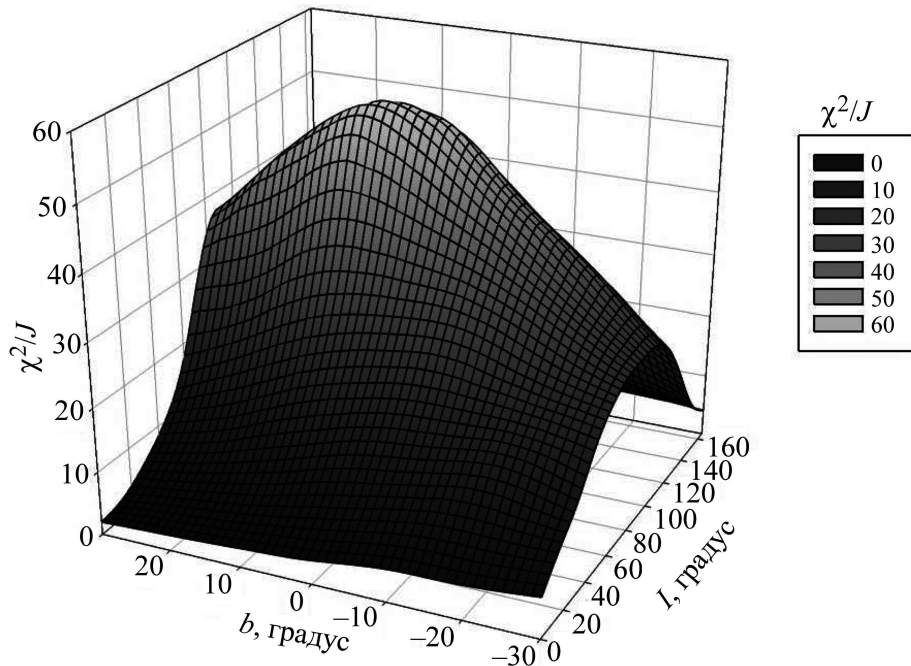


Рис. 1: Распределение χ^2/J для параметра S в галактической системе координат.

Для поиска максимума χ^2/J была получена зависимость χ^2/J от (l_0, b_0) , показанная на рис. 1 и рис. 2. Диапазон рассматриваемых направлений $l_0 = 0^\circ - 180^\circ$ и $b_0 = -30^\circ - 30^\circ$. Локализованный максимум распределения χ^2/J обнаружен в направлении $l_0 = 97^\circ \pm 3^\circ$, $b_0 = 5^\circ \pm 3^\circ$.

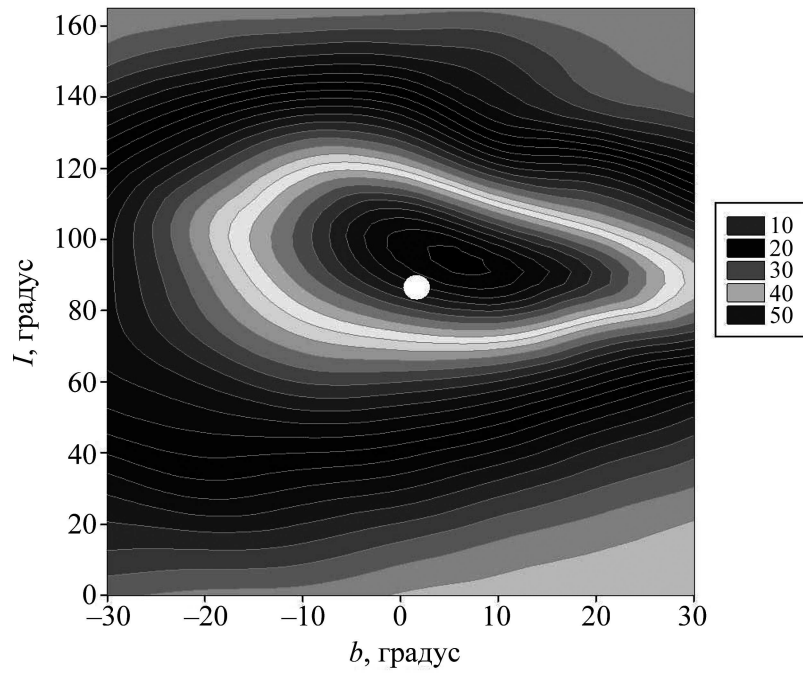


Рис. 2: То же, что на рис. 1, контурная диаграмма. Белый круг в центре – положение кластера Vela.

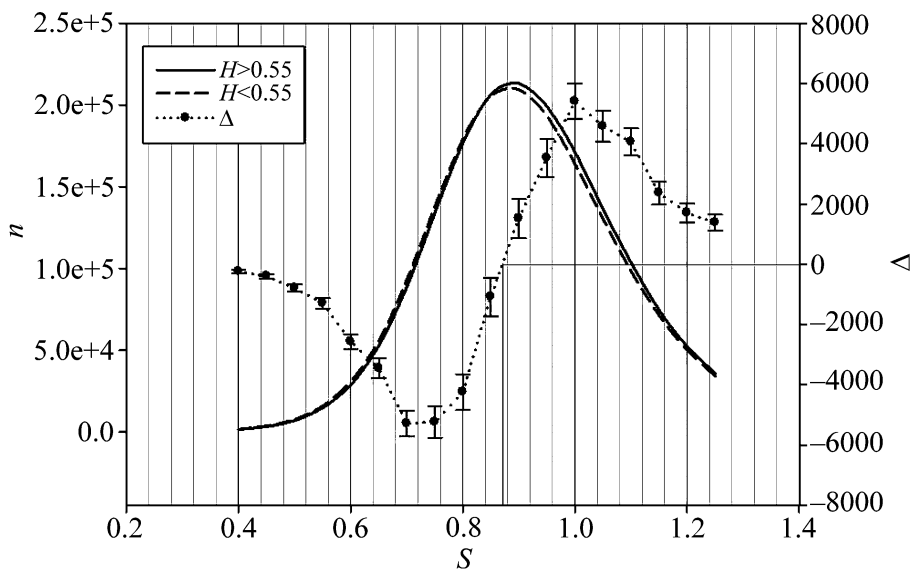


Рис. 3: Распределения по S для угла $l_0 = 97^\circ$, $b_0 = 5^\circ$ и обратного ему, правая шкала – разность Δ между ними.

Т а б л и ц а 1

Распределения по возрасту S

S	n		Δ	σ	Δ/σ
	$H > 0.55$	$H < 0.55$			
0.40	1393	1634	-241	55.0	-4.4
0.45	3214	3617	-403	82.6	-4.9
0.50	6865	7650	-785	120.5	-6.5
0.55	14580	15870	-1290	174.5	-7.4
0.60	28379	30939	-2560	243.5	-10.5
0.65	52522	55909	-3387	329.3	-10.3
0.70	88132	93369	-5237	426.0	-12.3
0.75	133334	138457	-5123	521.3	-9.8
0.80	175895	180188	-4293	596.7	-7.2
0.85	205543	206558	-1015	642.0	-1.6
0.90	212242	210641	1601	650.3	2.5
0.95	198178	194725	3453	626.8	5.5
1.00	170464	165176	5288	579.4	9.1
1.05	135799	131198	4601	516.7	8.9
1.10	103088	99050	4038	449.6	9.0
1.15	74108	71738	2370	381.9	6.2
1.20	52113	50475	1638	320.3	5.1
1.25	35595	34252	1343	264.3	5.1

Столбец 1 – значения S , столбцы 2 и 3 – число событий n в направлении $l_0 = 97^\circ$, $b_0 = 5^\circ$ и противоположном ему, соответственно. Столбцы Δ , σ и Δ/σ – разность между столбцами 2 и 3, среднеквадратичная ошибка разности и отношение разности к ее ошибке.

В таблице 1 приведены экспериментальные данные для возраста S в направлении $l_0 = 97^\circ$, $b_0 = 5^\circ$ для ШАЛ, приходящих из частей небесной сферы, разделённых по параметру $H_0 = 0.55$. Величина 0.55 подобрана так, чтобы число событий с обеих сторон было одинаковым. На рис. 3 показаны соответствующие распределения для направления $l_0 = 97^\circ$, $b_0 = 5^\circ$ (сплошная линия), противоположного ему $l_0 = 277^\circ$, $b_0 = -5^\circ$ (штриховая линия) и разность Δ между распределениями (кривая с ошибками).

Т а б л и ц а 2

Зависимость параметра $nE_0^{1.7}$ от E_0 (n – число событий)

$E_0 \cdot 10^{-14}$, эВ	$nE_0^{1.7}$ $H > 0.55$	$nE_0^{1.7}$ $H < 0.55$	Δ	σ	Δ/σ
1.00	2518	2631	-113	71.7	-1.6
1.58	79831	83391	-3560	597.5	-6.0
2.51	1147168	1175618	-28450	3334.0	-8.5
3.98	4970294	5120105	-149811	10277.9	-14.6
6.31	10005028	10268177	-263149	21548.5	-12.2
10.00	13071512	13463556	-392044	36463.6	-10.8
15.85	13649390	13995570	-346180	55051.0	-6.3
25.12	13156862	13367718	-210856	79762.4	-2.6
39.81	12081955	12331834	-249879	113184.4	-2.2
63.10	10699998	10840413	-140415	157259.0	-0.9
100.00	9177689	9380816	-203127	215904.9	-0.9
158.49	7983836	7874125	109711	295272.1	0.4
251.19	7940497	7196120	744377	426929.7	1.7
398.11	7404421	7671228	-266807	630165.6	-0.4
630.96	7816351	6373961	1442390	906200.9	1.6
≥ 1000.00	13135020	13177106	-42084	1308309.4	-0.0

Столбец 1 – E_0 , столбцы 2 и 3 – значения $nE_0^{1.7}$ в направлении $l_0 = 97^\circ$, $b_0 = 5^\circ$ и противоположном ему, соответственно. Столбцы Δ , σ и Δ/σ – то же, что в таблице 1.

В таблице 2 и на рис. 4 приведены распределения по E_0 для параметра $nE_0^{1.7}$. Параметр $nE_0^{1.7}$, зависящий от энергии E_0 , был выбран для того, чтобы увидеть положение колена и выяснить, есть ли в его окрестностях избыток частиц ПКИ, и с найденного или противоположного направления он приходит. Здесь n – число событий, зарегистрированных на установке в заданном энергетическом интервале без всякого учета методических эффектов. Как было отмечено ранее, в разностном методе автоматически вычитается общий фон и возможные методические ошибки, так как они одни и те же в обоих наборах при стабильной работе установки.

Обсуждение результатов. Распределения по S для противоположных направлений очень похожи, но параметр χ^2/J выявляет заметные различия. Максимальное значе-

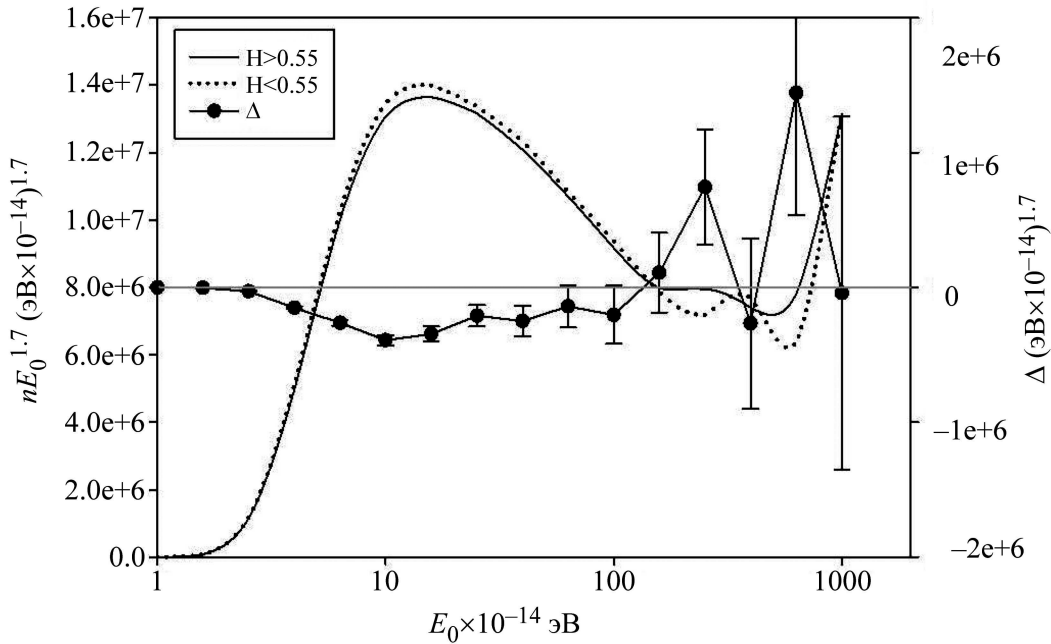


Рис. 4: Зависимость $nE_0^{1.7}$ от E_0 для тех же углов, что на рис. 3, Δ – разность между ними.

ние χ^2/J в точке $l_0 = 97^\circ \pm 3^\circ$, $b_0 = 5^\circ \pm 3^\circ$ составляет 57.64 ± 0.34 при 17 степенях свободы. Это очень большая величина. При случайном разбросе значение χ^2/J должно быть близко к 1, причем предполагается, что все слагаемые имеют одну ошибку σ и, соответственно, одинаковые статистические веса. В нашем случае это не так, поэтому возможно искажение χ^2/J , но искажение должно быть одинаковым для всех направлений (l_0, b_0) , так как σ_i в каждом интервале не зависит от направления. Кроме того, $(\chi^2/J) - 1$ в нашем случае линейно зависит от полного числа событий, а в обработке использовалась большая статистика – 3.38 млн. ШАЛ. Для контроля было найдено направление $l_0 = 15^\circ \pm 10^\circ$, $b_0 = 60^\circ \pm 10^\circ$, в котором χ^2/J имеет минимум, равный 1.32 ± 0.34 , что в пределах стандартного отклонения совпадает со случайным распределением Δ/σ . Это свидетельствует об отсутствии систематического искажения и о высокой статистической обеспеченности направления $l_0 = 97^\circ$, $b_0 = 5^\circ$. Следует отметить, что направление с минимальным χ^2/J перпендикулярно направлению с максимальным χ^2/J , хотя и определено с худшей угловой точностью.

Из таблицы 2 и рис. 4 видно, что в области колена имеется избыток ливней из направления $l_0 = 277^\circ$, $b_0 = -5^\circ$. Вблизи этой точки находится кластер в созвездии Парусов (Vela) с двумя близко расположенными остатками сверхновых Vela X (263.9° ,

-3.3°) и Vela Jr (266.2° , -1.2°), расстояния до которых составляют около 0.3 и 0.2 кпс соответственно.

Очевидно, что кластер является хорошим кандидатом на близкий источник ПККИ.

Сдвиг по долготе относительно остатков сверхновых и неполная аксиальная симметрия в направлении на источник могут быть связаны с наличием регулярного магнитного поля между источником и Землей или с ошибкой метода.

Избыток “молодых” ШАЛ с этого направления может быть связан с механизмом диффузии на пути от источника до Земли. Более молодые ливни характеризуют более легкий состав ПККИ с преобладанием протонов. При одинаковой энергии, чем тяжелее ядра, тем более они отклоняются в магнитных полях, поэтому поток ПККИ по пути к Земле при диффузном переносе обогащается протонами в направлении источника, приводя в итоге к облегчению состава и омоложению ШАЛ, пришедших со стороны источника, по сравнению с ливнями с обратной стороны.

Предварительные выводы. С помощью диффузионно-разностного анализа возраста ливней S в области колена экспериментально получен статистически обеспеченный избыток частиц ПККИ со стороны локального источника Южного полушария неба (Vela) относительно потока ПККИ с обратного направления. Избыток регистрируется на установке ГАММА на г. Арагац в виде ШАЛ с более молодым, чем с другой стороны, возрастом. Вычитание избытка частично уменьшает резкость излома, но не устраняет его полностью. Поскольку зарегистрирован только избыток, а не абсолютная величина потока от источника, на основе полученных предварительных данных нельзя сказать, полностью ли он формирует колено или возможен вклад других источников.

Возможно, зарегистрированный избыток объясняет утяжеление состава ПККИ при энергиях выше колена по сравнению с энергиями в области колена, наблюдаемое на многих установках [11, 12], а также падение S с ростом энергии в области ниже колена с дальнейшим его постоянством, а, возможно, и последующим ростом [13, 14]. Падение более быстрое, чем можно ожидать из-за сдвига максимума ШАЛ с ростом энергии.

Обнаружен только один близкий источник, находящийся в радиусе чувствительности метода – возможно, это кластер Vela, включающий в себя источники Vela X и Vela Jr.

Зарегистрировано обеднение потока ПККИ тяжелыми ядрами, что, по-видимому, объясняется наличием диффузионного процесса для ПККИ на пути от близкого источника до Земли, вызывающего облегчение состава и, соответственно, омоложение ШАЛ в районе колена.

Диффузионный процесс в направлении Центр Галактики – Антицентр в пределах статистической чувствительности метода не зарегистрирован.

Заключение. Исследование свойств ШАЛ диффузионно-разностным методом показало его простоту, высокую чувствительность и способность обследовать всю небесную сферу на установке с ограниченными углами обзора в лабораторной системе координат.

Основное отличие метода от других – разностное исследование *характеристик*, а не *интенсивности* ШАЛ в разных направлениях.

В качестве экспериментальных параметров, кроме возраста S , могут использоваться другие характеристики ШАЛ и их комбинации.

Не требуется проведения специализированных экспериментов – можно анализировать уже имеющиеся экспериментальные данные.

Авторы выражают благодарность всем сотрудникам ФИАН и ЕрФИ, принимавшим участие в создании и эксплуатации установки ГАММА. Авторы также выражают благодарность руководству ОЯФА ФИАН и ЕрФИ, ДЕЗИ, Госкомитету по науке РА, Всеармянскому фонду Айастан и Программе фундаментальных исследований Президиума РАН “Фундаментальные свойства материи и астрофизика” за финансовую поддержку.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Г. Б. Христиансен, Г. В. Куликов, ЖЭТФ **35**, 635 (1958).
- [2] В. С. Птускин, Успехи физ. наук **177**, 558 (2007).
- [3] E. G. Berezhko, H. Volk, Astron. Astrophys. **451**, 981 (2006); astro-ph/0602177.
- [4] A. D. Erlykin, A. W. Wolfendale, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **23**, 979 (1997).
- [5] A. P. Garyaka et al., Astroparticle Physics **28**, 169 (2007).
- [6] A. P. Garyaka, R. M. Martirosov, S. V. Ter-Antonyan, et al., J. Phys. G: Nucl. **35**, 115201 (2008).
- [7] A. P. Garyaka, R. M. Martirosov, S. H. Sokhoyan, et al., Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences) **48/2**, 51 (2013).
- [8] <http://astro.prao.ru/utilities/utilcoor.html>.
- [9] G. Guillian et al., Phys. Rev. D **75**, 062003 (2007); astro-ph/0508468.
- [10] В. П. Павлюченко, Краткие сообщения по физике ФИАН **40(3)**, 3 (2014).
- [11] W. D. Apel et al., Astropart. Phys. **24**, 1 (2005).
- [12] N. M. Budnev et al., Nucl. Phys. Proc. Suppl. **190**, 247 (2009).

- [13] K. V. Cherdyntseva, A. P. Chubenko, P. A. Dyatlov, et al., Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) **122**, 231 (2003).
- [14] R. M. Martirosov et al., Proc. 32 Int. Cosm. Ray Conf., Beijing, **1**, 178 (2011).
- [15] Y. A. Gallant et al., Proc. 29th Int. Cosm. Ray Conf., Pune, **4**, 85.88 (2005).

Поступила в редакцию 2 апреля 2014 г.