

УДК 523.165

СВОЙСТВА РАЗНОСТНОГО МЕТОДА ДЛЯ ПОИСКА АНИЗОТРОПИИ ПЕРВИЧНОГО КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. П. Павлюченко¹, Р. М. Мартиросов², Н. М. Никольская¹,
А. Д. Ерлыкин¹

Анализируются методические особенности и свойства оригинального разностного метода для поиска анизотропии в области излома (колена) энергетического спектра частиц первичного космического излучения. Показано, что метод, в котором исследуются не интенсивности, а свойства потоков частиц, устойчив к случайным ошибкам эксперимента и позволяет отделять аномалии, связанные с лабораторной системой координат, от аномалий в небесных координатах. Метод использует многократное рассеяние заряженных частиц в магнитных полях Галактики для исследования всей небесной сферы, в том числе областей неба за пределами прямой видимости установки.

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

Энергетический спектр заряженных частиц первичного космического излучения (ПКИ) хорошо описывается степенным законом $E^{-\gamma}$ с показателем 2.7 от энергии $\sim 10^{11}$ эВ вплоть до $3 \cdot 10^{15}$ эВ, когда показатель быстро возрастает до 3.1 (колена) [1]. Основные астрофизические гипотезы о природе колена [2–4], связанные с проблемой происхождения ПКИ, до сих пор не получили надежного экспериментального подтверждения. Это связано с перемешиванием траекторий заряженных частиц хаотическими магнитными полями Галактики, в результате которого изотропия интенсивности ПКИ с первичной энергией $10^{14} - 10^{16}$ эВ выполняется с точностью не хуже одного процента

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: pavict@rambler.ru.

² Национальная научная лаборатория имени А. Алиханяна (ЕрФИ), 375036 Армения, Ереван, ул. Братьев Алиханян, 2.

[5]. Распространение частиц ПКИ в масштабе Галактики подобно броуновскому движению или крупномасштабному диффузному переносу. Поэтому сейчас основной задачей является хотя бы обнаружение надежно статистически обеспеченных аномалий свойств ПКИ на небесной сфере.

Разностный метод анализа экспериментальных данных [6, 7], изначально учитывающий диффузный характер распространения ПКИ в Галактике и обладающий высокой чувствительностью, был специально разработан для поиска аномалий. В нем анализируется не интенсивность потоков частиц из разных участков неба, а аномалии массового состава ПКИ, так как ядра разной массы при прочих равных условиях по-разному рассеиваются в одних и тех же магнитных полях. При этом многократное рассеяние частиц в Галактике (диффузия) не только не мешает, но и помогает регистрировать ПКИ от источников, лежащих за пределами прямой видимости установки.

Массовый состав по данным ШАЛ определяется с большими ошибками косвенными методами с использованием модельно зависимых расчетов. Но для первичного поиска аномалий требуется определить только разность характеристик ПКИ в противоположных направлениях, а не их абсолютные значения. В этом случае можно использовать хорошо измеряемый параметр, зависящий от массового состава и минимально зависящий от моделей развития ШАЛ.

Суть метода: в небесных координатах задаются произвольные направления (l_0, b_0) , затем вокруг каждого из них строится конус с раствором ψ_0 так, чтобы он делил всю статистику на два равных по числу событий набора. В обоих наборах строятся распределения выбранного анализируемого параметра, и эти распределения вычитаются друг из друга с вычислением $\chi^2 = \sum_i (\Delta_i / \sigma_i)^2$, где $\Delta_i = m_i - m_i^{\text{anti}}$ – разность между числом событий в этих распределениях в интервале i , а ее ошибка $\sigma_i = \sqrt{m_i + m_i^{\text{anti}} + 1} = \sqrt{n_i + 1}$. Здесь n_i – суммарное число событий в обоих наборах в интервале i , оно не зависит от заданных углов (l_0, b_0) , что имеет решающее значение для сравнения величин χ^2 при разных (l_0, b_0) между собой в поисках максимума. В направлении максимума χ^2 максимально отличаются массовые составы ПКИ, приходящих с противоположных сторон, что свидетельствует о сепарации по жесткости заряженных ядер в хаотических магнитных полях Галактики.

При вычитании распределений автоматически вычитается общий фон и методические неопределенности, т.к. они одни и те же в обоих наборах при стабильной работе установки.

Косинус H плоского угла между направлением (l_0, b_0) и ШАЛ с углами (l, b) в сферической системе координат равен $H = \cos \psi = \sin b_0 \sin b + \cos b_0 \cos b \cos(l - l_0)$, поэтому при $H > H_0 = \cos \psi_0$ ливень попадает в конус, а при $H \leq H_0$ – нет.

Экспериментальные результаты. В настоящем исследовании использовались 3.38 млн ШАЛ с первичной энергией $10^{14} - 10^{17}$ эВ, зарегистрированных в 2011–2013 годах на установке ГАММА (г. Арагац, Армения, 3200 м над уровнем моря), оси которых попали в круг радиусом 60 м от центра установки. В качестве рабочего параметра использовался “поперечный” возраст ливня S – параметр, получаемый подгонкой функции Нишимуры–Каматы–Грейзена пространственного распределения (ФПР) электронов ШАЛ к показаниям наземных ливневых e/γ детекторов. Он характеризует крутизну спада ФПР. Параметр S выбран из-за его слабой зависимости от первичной энергии и толщины атмосферы вблизи максимума ШАЛ. Он достаточно надежно определяется в эксперименте и используется при вычислении мощности ливня N_e и первичной энергии E_0 [8]. Возраст S зависит от массового состава, т.к. тяжелые ядра по сравнению с протонами при равных энергиях взаимодействуют на большей высоте в атмосфере, дробление первичной энергии и каскадное развитие ШАЛ у них быстрее, поэтому на уровне наблюдений они дают более широкие ФПР с большими S .

Был произведен “слепой” поиск аномалий вблизи Галактической плоскости. Единственный максимум $\chi^2/J = 57.6$ при 17 степенях свободы J обнаружен в направлении $l_0 = 97^\circ \pm 3^\circ$, $b_0 = 5^\circ \pm 3^\circ$. Из-за независимости χ^2 от знака $\Delta_i = m_i - m_i^{\text{anti}}$ потребовался дополнительный анализ, который показал, что на самом деле аномалия находится с обратной стороны, в направлении $l_0 = 277^\circ$, $b_0 = -5^\circ$ (экваториальные координаты $\alpha = 140^\circ$, $\delta = -57^\circ$, Южное полушарие неба), и она относится к первичным энергиям в области излома. Более подробно установка ГАММА и полученные результаты описаны в [7, 9, 10].

Анализ метода. Прежде всего было проверено значение $\chi^2/J = 57.6$ в максимуме при 17 степенях свободы. Это очень большая величина. При случайном разбросе χ^2/J должно быть близко к $1 \pm \sqrt{2/J}$, а каждое увеличение его на единицу увеличивает статистическую значимость отклонения результата от случайных флуктуаций примерно на одну σ . Следовательно, значимость полученного результата составляет более 50σ . Путем деления полного числа событий на 2, 3, 5, 10 мы убедились, что эта величина обусловлена, в основном, большой статистикой и высокой чувствительностью метода, использующего полную статистику в каждой точке неба. Для проверки отбирались каждое второе событие, каждое третье и т.д., чтобы уменьшить статистику, но мини-

мально изменить условия регистрации ШАЛ. Величина максимума χ^2/J уменьшилась с 57.6 до 29.4, 20.3, 12.6 и 7.9 соответственно, т.е. при практически неизменной форме распределений величина $(\chi^2/J) - 1$ в нашем случае линейно зависит от статистики.

Величина χ^2/J может также по какой-либо причине систематически завышаться, поэтому для проверки было найдено направление, в котором χ^2/J имеет минимум. Он равен 1.32 при $l_0 = 15^\circ$, $b_0 = 60^\circ$ и в пределах стандартного отклонения совпадает со случайным распределением Δ/σ . Обе проверки свидетельствуют о высокой статистической обеспеченности аномалии.

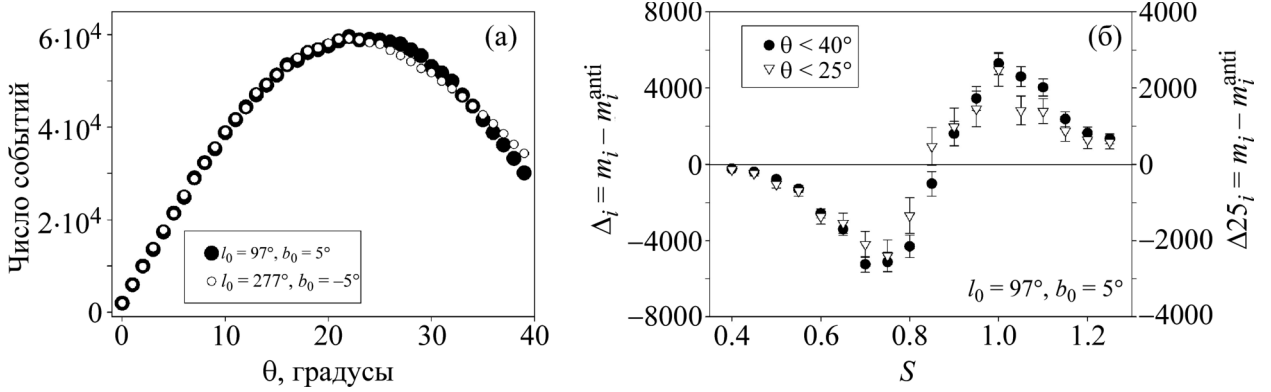


Рис. 1: (а) Распределение ШАЛ по зенитному углу θ в максимуме χ^2/J для противоположных направлений; (б) зависимость разностей $\Delta_i = m_i - m_i^{\text{anti}}$ от параметра S для всех ШАЛ (левая шкала) и для ШАЛ с $\theta < 25^\circ$ (правая шкала).

Асимметрия установки по зенитным или азимутальным углам также может имитировать аномалию. Диапазон зенитных углов θ используемых ШАЛ составляет $0^\circ - 40^\circ$. Условия развития и регистрации ливней при $\theta = 40^\circ$ отличаются от условий для вертикальных ливней, поэтому были получены распределения ливней по углам θ для противоположных направлений в области аномалии (рис. 1(а)). Видно, что до 25° распределения полностью совпадают, а далее есть некоторое различие, поэтому был проведен поиск аномалии по выборке с $\theta < 25^\circ$ (1.96 млн ШАЛ). Координаты максимума, как и форма распределения разностей $\Delta_i = m_i - m_i^{\text{anti}}$ в максимуме, в пределах ошибок не изменились (рис. 1(б)). Величина максимума упала с 57.6 до 19.1, как и должно быть из-за уменьшения статистики и сужения сектора отбора. Видно, что в области малых S разности отрицательны, т.е. “молодые” ШАЛ идут с обратного направления (Южного полушария).

Можно заключить, что координаты и свойства аномалии устойчивы относительно диапазона используемых зенитных углов ШАЛ, но сужение диапазона приводит к уменьшению достоверности результата.

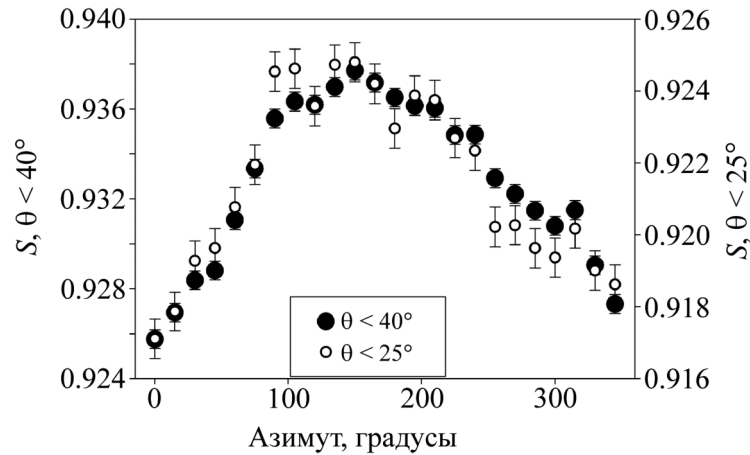


Рис. 2: Зависимость S от азимутального угла в горизонтальной астрономической системе для ШАЛ с зенитными углами $\theta < 40^\circ$ и $\theta < 25^\circ$.

Для проверки влияния азимутальных углов на аномалию была получена зависимость возраста S от азимута A в горизонтальной астрономической (лабораторной) системе, в которой 0° направлен на юг (рис. 2). Видна небольшая регулярная почти синусоидальная зависимость S от A , по форме одинаковая для двух диапазонов зенитных углов θ .

Эта зависимость может быть как причиной аномалии, так и ее следствием. Предположим, что зависимость $S(A)$ возникла из-за какой-либо асимметрии экспериментальной установки и является причиной аномалии. Тогда внесение корректирующей поправки, устраняющей зависимость $S(A)$, должно привести к изменению координат или уничтожению аномалии. Для проверки этого во всех ливнях из S были вычтены соответствующие поправки $\delta(A) = S(A) - \langle S \rangle$, и по измененным данным, как и ранее, был проведен поиск аномалии (рис. 3(а)).

Видно, что положение основного максимума в пределах ошибок не изменилось, но уменьшилась величина χ^2/J в максимуме до 26.3. Дополнительно появился аксиально симметричный второй максимум величиной $\chi^2/J = 20.3$ с координатами $l_0 = 123^\circ$, $b_0 = 27^\circ$, которые совпадают с направлением оси вращения Земли – Полусом Мира.

Уменьшение основного максимума и появление на Полусе дополнительного означает, что введением поправки было внесено не улучшение исходных экспериментальных

данных, а их ухудшение, имитирующее асимметрию установки. Действительно, любая асимметрия установки в системе координат, вращающейся вместе с Землей, может быть разложена на две составляющие: параллельную оси вращения и перпендикулярную. За три года работы установки Земля совершила более 1000 оборотов, поэтому составляющая, перпендикулярная оси установки, с хорошей точностью уничтожилась как $\int_0^{2\pi} \sin AdA$, о чем говорит совпадение дополнительного максимума с Полюсом с точностью до градуса, а составляющая, параллельная оси, суммировалась и проявилась в виде пика.

Это утверждение было проверено другим способом: ко всем исходным S в событиях с азимутом $A = 45^\circ - 60^\circ$ прибавлялось число 0.07, чем имитировалась анизотропия в этом направлении. Величина 0.07 была выбрана из соображения, чтобы эффект был заметен, но не катастрофичен. На рис. 3(б) показан результат. Видно, что основной максимум опять не изменил положения, но уменьшился до 34.5, и опять на Полюсе возник второй пик высотой 34.6, обусловленный созданной анизотропией. На рис. 3(в) показан результат прибавления к S увеличенной до 0.1 добавки, но для событий с

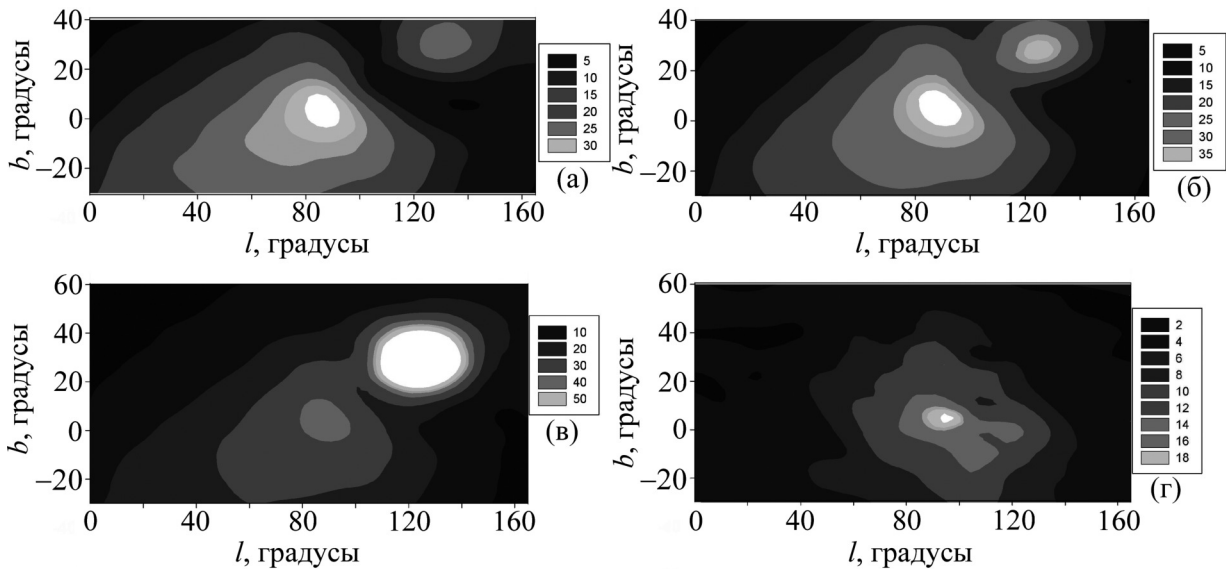


Рис. 3: Зависимость χ^2/J от Галактических координат (l_0, b_0) , контурные диаграммы: (а) введены поправки, выравнивающие зависимость S от азимута, (б) в диапазоне азимутов $45^\circ - 60^\circ$ к S добавляется 0.07, (в) в диапазоне азимутов $300^\circ - 315^\circ$ к S добавляется 0.1, (г) ко всем S добавляется случайное число, разыгранное по Гауссу со средним $= 0$ и $\sigma = 0.25$.

азимутами $300^\circ - 315^\circ$, перпендикулярных предыдущим. Эффект качественно остался тем же: пик основного максимума уменьшился до 33.4, но на Полюсе увеличился до 88.2 (на рисунке его вершина срезана до 50, чтобы был виден основной пик).

Чтобы убедиться, что пик на Полюсе возникает из-за асимметрии в лабораторной системе, а не просто из-за случайных ошибок при вычислении S , к исходной величине S во всех событиях, независимо от азимута, было прибавлено случайное число, разыгранное по Гауссу со средним 0 и разными σ . Основной максимум не изменил положение, но уменьшился до 42.7 при $\sigma = 0.1$ и до 19.4 при $\sigma = 0.25$ (рис. 3(г)). Если учесть, что исходное экспериментальное распределение S имеет $\sigma = 0.16$, то неизменность положения максимума при таких больших искажениях показывает высокую устойчивость метода относительно случайных экспериментальных ошибок.

Возвращаясь к рис. 2, можно заключить, что обнаруженная зависимость S от азимута относится к небесным координатам и указывает на приход более молодых ШАЛ (более легких первичных частиц) из Южной полусферы.

Оказать влияние на полученные координаты могут солнечно-суточные геофизические изменения. На рис. 4(а) приведена зависимость S от номера часа в сутках, показывающая слабую регулярную зависимость. Ее вычитание в качестве поправки увеличило максимум до 58.7 вместо 57.6, т.е. это действительно помеха, она связана с Земной системой координат и пренебрежимо мала по величине. На Полюсе величина χ^2/J не изменилась.

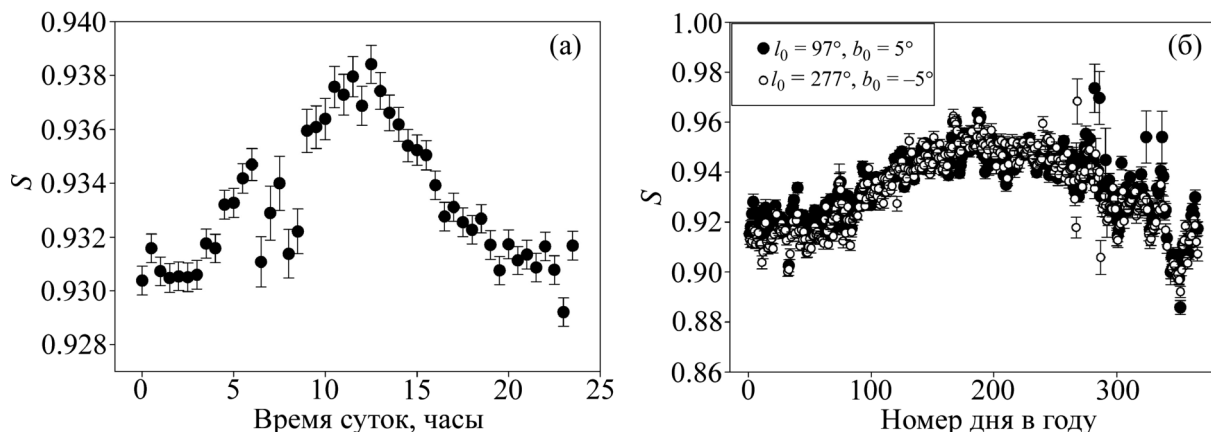


Рис. 4: (а) Зависимость S от времени суток UTC. Между 5–11 часами (10–16 локальное время) проводилась настройка детекторов; (б) зависимость S от номера дня в году для набора ливней в направлении $97^\circ, 5^\circ$ и противоположном $277^\circ, -5^\circ$.

Была обнаружена регулярная зависимость S от номера дня в году (рис. 4(б)) с амплитудой, почти на порядок превосходящей солнечно-суточную. По форме она совпадает с сезонным ходом температуры, что может свидетельствовать о достаточно сильной зависимости S от температуры воздуха. На рисунке распределения S для наборов событий из противоположных направлений хорошо совпадают, поэтому при их вычитании для оценки χ^2/J зависимость S от номера дня должна уничтожиться или сильно уменьшиться. Как отмечалось выше, в разностном методе автоматически уничтожаются фоновые и методические неопределенности, так как они одни и те же в обоих наборах.

Следует также отметить, что из аномалии (день номер ≈ 220) приходят более “молодые” ШАЛ по сравнению с ливнями с противоположного направления (рис. 1(б) и 4(б)), что находится в противофазе с температурной зависимостью.

При всех проверках использовались одни и те же 3.38 млн событий.

Из проведенных проверок можно сделать достаточно определенный вывод: случайные ошибки параметра S не меняют положение аномалии, но приводят к уменьшению высоты максимума χ^2/J , зависящей от величины искажений. Если искажения еще и азимутально асимметричны в системе, вращающейся вместе с Землей, то они вызывают появление максимума χ^2/J в направлении оси вращения Земли.

Следовательно, разностный метод не только подавляет фоновые и методические неопределенности, но и позволяет отделять эффекты, связанные с лабораторной земной системой, от эффектов, связанных с неподвижной системой небесных координат. Обнаружение пика на Полюсе свидетельствует об азимутальной асимметрии экспериментальной установки, а его отсутствие говорит об отсутствии асимметрии или о хорошей ее компенсации, что маловероятно.

Обсуждение результатов. Исследование свойств разностного метода, использующего количественный критерий χ^2/J для возраста ливней S , показало его высокую чувствительность и устойчивость. Метод обладает уникальным свойством, позволяющим отделять эффекты, связанные с лабораторной системой, от эффектов, связанных с неподвижной системой небесных координат: пик на Полюсе указывает на аномалии, связанные с солнечно-суточным вращением Земли. Устойчивая аномалия в других направлениях относится, скорее всего, к небесным координатам.

Вблизи найденной аномалии (статистическая обеспеченность $> 50\sigma$) с Галактическими координатами $l_0 = 277^\circ$, $b_0 = -5^\circ$ находится кластер в созвездии Парусов (Vela) с двумя близко расположенными остатками сверхновых Vela X (263.9° , -3.3°) и Vela

Jr ($266.2^\circ, -1.2^\circ$), расстояния до которых составляют около 0.3 и 0.2 кпс соответственно. Очевидно, что кластер является хорошим кандидатом на близкий источник ПККИ, связанный с формированием колена: он близок к обнаруженной аномалии по направлению, близок к Земле по расстоянию, его энергия близка к энергии колена. К сожалению, разностный метод не дает интенсивности потока частиц от источника.

Некоторый сдвиг координат аномалии относительно кластера Vela и неполная аксиальная симметрия максимума могут быть связаны с наличием регулярного магнитного поля между источником и Землей.

Избыток “молодых” ШАЛ с этого направления, как и ожидалось, скорее всего, связан с механизмом диффузии на пути от источника до Земли. Более молодые ливни характеризуют более легкий состав ПККИ с преобладанием протонов. При диффузном переносе чем тяжелее ядра, тем более они отклоняются в магнитных полях, поэтому поток ПККИ в направлении источник – Земля по пути обедняется ими, приводя в итоге к облегчению состава и омоложению ШАЛ по сравнению с ливнями с обратной стороны.

Обнаружено достаточно сильное изменение “поперечного” возраста S от номера дня в году, совпадающее с сезонным ходом температуры воздуха. Эффект требует проверки прямым измерением зависимости S от температуры, и если он реально значим, то должен учитываться при обработке экспериментальных данных и моделировании каскадных процессов в атмосфере. Возраст S является одной из базовых характеристик ШАЛ, так как он используется при вычислении мощности ливня N_e , первичной энергии E_0 и массового состава ПККИ. К сожалению, на установке ГАММА, которая в настоящее время завершила свою работу, данные о состоянии атмосферы не регистрировались.

Заключение. Диффузионно-разностный метод показал свою простоту, высокую чувствительность и устойчивость к случайным ошибкам. Он способен обследовать всю небесную сферу на установке с ограниченным сектором обзора в лабораторной системе координат и отделять аномалии в системе координат, связанной с суточным вращением Земли, от аномалий в небесных координатах. Обнаруженная аномалия хорошо подходит на роль близкого источника при формировании колена в спектре ПККИ.

Основное отличие метода от традиционных – 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.

Авторы выражают благодарность всем сотрудникам ФИАН и ЕрФИ, принимавшим участие в создании и эксплуатации установки ГАММА. Авторы также выражают бла-

годарность руководству ОЯФА ФИАН, ЕрФИ 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] G. Guillian et al., *Phys. Rev. D* **75**, 062003 (2007); astro-ph/0508468.
- [6] В. П. Павлюченко, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **41**(3), 3 (2014).
- [7] В. П. Павлюченко, Р. М. Мартиросов, Н. М. Никольская, А. Д. Ерлыкин и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **41**(5), 55 (2014); arXiv:1406.0799 [astro-ph.HE].
- [8] С. Хаякава, *Физика космических лучей, том 1* (М., Наука, 1973) [S. Hayakawa, *Cosmic Ray Physics, Nuclear and Astrophysical aspects* (Wiley, New York, 1969)].
- [9] A. P. Garyaka et al., *Astroparticle Physics* **28**, 169 (2007).
- [10] A. P. Garyaka, R. M. Martirosov, S. V. Ter-Antonyan, et al., *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **35**, 115201 (2008).

Поступила в редакцию 29 июня 2015 г.