

АНАЛИЗ АНИЗОТРОПИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ЭНЕРГИЕЙ ОКОЛО 10^{17} ЭВ ПО ДАННЫМ ЯКУТСКОЙ УСТАНОВКИ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ

*М. И. Правдин**, *А. А. Иванов*, *А. Д. Красильников*,
А. А. Михайлов, *И. Е. Слепцов*

*Институт космофизических исследований и астрономии
Сибирского отделения Российской академии наук
677891, Якутск, Россия*

Поступила в редакцию 7 декабря 2000 г.

В работе проводится гармонический анализ направлений прихода частиц космических лучей с энергией около 10^{17} эВ вблизи порога регистрации Якутской установки широких атмосферных ливней. Предлагается методика определения вклада в наблюдаемую анизотропию, возникающего из-за неоднородности условий обзора установкой небесной сферы и сезонных вариаций частоты широких атмосферных ливней. Учет этих факторов приводит к существенному уменьшению амплитуды, характеризующей степень анизотропии первичных космических лучей. Амплитуда первой гармоники по прямому восхождению равна $(0.45 \pm 0.55)\%$ и показывает, что при 10^{17} эВ не наблюдается статистически значимая анизотропия первичного излучения.

PACS: 96.40.Pq, 98.70.Sa

1. ВВЕДЕНИЕ

Определение степени анизотропии первичного потока и ее зависимости от энергии E_0 имеет важное значение для решения проблемы происхождения космических лучей. В области 10^{17} эВ и выше характеристики космического излучения исследуются с помощью установок, которые регистрируют широкие атмосферные ливни из вторичных частиц, образующиеся при попадании первичных частиц таких энергий в атмосферу Земли. На установках по регистрации широких атмосферных ливней одним из основных методов для оценки анизотропии является гармонический анализ распределения направлений прихода ливней по прямому восхождению [1]. В предыдущей работе [2] по данным Якутской установки [3] за период 1982–1995 гг. в интервале энергий $3 \cdot 10^{16} < E_0 < 3 \cdot 10^{17}$ эВ для прямого восхождения была получена статистически значимая амплитуда первой гармоники $r_1 = (1.35 \pm 0.36)\%$ и фаза $\varphi_1 = 123^\circ \pm 15^\circ$. Ранее в работе [4] на установке

Хавера Парк приблизительно в этом же интервале энергий было получено значение $r_1 = (1.7 \pm 0.4)\%$, но фаза $\varphi_1 = 218^\circ \pm 14^\circ$ значительно отличается от результата [2]. Как видно из этих данных, наблюдаемая амплитуда при таких энергиях мала и для получения истинной анизотропии космических лучей необходимо проверить, насколько существенны вклады аппаратного и атмосферного происхождения. В предыдущей нашей работе [2] не анализировалось влияние сезонных изменений атмосферных условий.

В процессе длительной эксплуатации установки возникают остановки регистрации по техническим и технологическим причинам, может также изменяться эффективная площадь сбора событий из-за временного отказа отдельных детекторов, участвующих в отборе ливней. Это может привести к неоднородному обзору неба для разных моментов времени как солнечных, так и звездных суток. Кроме того, для Якутской установки и аналогичных ей энергия $E_0 \approx 10^{17}$ эВ является пороговой и на частоту регистрации ливневых событий оказывают влияние атмосферные условия, которые имеют суточный и

*E-mail: m.i.pravdin@ikfia.ysn.ru

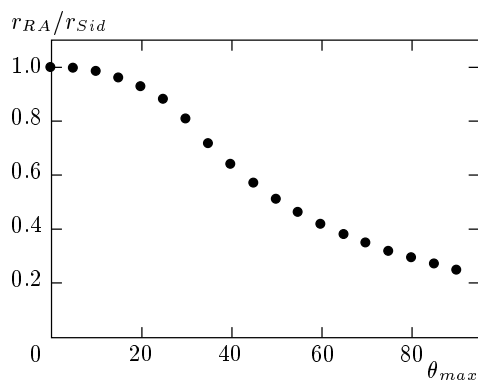


Рис. 1. Зависимость отношения амплитуды по прямому восхождению r_{RA} к амплитуде по звездному времени r_{Sid} искусственного происхождения от θ_{max} — предельного зенитного угла используемых в анализе событий для широты Якутской установки широких атмосферных ливней. В расчете предполагается равномерное распределение регистрируемых ливней по сфере

сезонные циклы. Так как в разные моменты времени звездных суток условия обзора направлений для разных значений прямого восхождения не совпадают (если установка не на полюсе), неоднородность обзора неба и изменения атмосферных условий могут внести существенный вклад в результаты измерений, искажающий истинную анизотропию первичного излучения. Степень их влияния на результаты анализа в разных экспериментах может различаться и определяется многими факторами — климатическими условиями, самой триггерной системой установки, эффективная площадь которой зависит от температуры и давления, критериями отбора событий, возможными систематическими ошибками при определении параметров и энергии ливня для разных атмосферных условий, а также частотой кратковременных отключений установки в определенные моменты суток. На рис. 1 для иллюстрации приведены результаты расчета зависимости отношения амплитуды первой гармоники по прямому восхождению к амплитуде по звездному времени, искусственно возникающей из-за условий наблюдения, от максимального зенитного угла используемых в анализе событий для широты Якутской установки. В расчете принималось, что регистрируемые ливни распределены равномерно по сфере.

Для исследования анизотропии космических лучей по данным установок, на которых не измеряется направление прихода в индивидуальных событиях ($E_0 < 10^{14}$ эВ), проводится анализ распределения по

звездному времени. Для того чтобы учесть вклад вариаций в частоту регистрируемых событий, связанных с суточным и сезонным циклами, используется распределение этих же событий по искусственному «антизвездному» времени по методике, предложенной в работе [5]. Эта методика применима и для анализа ливней, в которых направление либо определено с плохой точностью, либо вообще не определяется из-за флуктуаций времени прихода отдельных частиц ливня, что происходит вблизи порога регистрации. В то же время данные о вкладе сезонных вариаций, получаемые по антизвездному времени, можно использовать для оценки степени искажения вектора анизотропии по прямому восхождению. В настоящей работе мы применили методику анализа по звездному времени для данных Якутской установки вблизи $E = 10^{17}$ эВ и сравнили с результатом, получаемым по прямому восхождению для одной и той же выборки. При этом изучалась степень влияния на получаемые результаты вышеупомянутых факторов — неоднородного обзора неба и атмосферных вариаций.

2. ОТБОР СОБЫТИЙ

На Якутской установке регистрация ливней происходит при совпадении сигналов от трех соседних станций, образующих треугольник. В схеме отбора заложено два типа сочетаний. В один входят станции, образующие сетку из треугольников со стороной 500 м (Триггер-500), в другой — со стороной 1000 м (Триггер-1000). Порог регистрации для первого отбора соответствует ливням с энергией $(3-5) \cdot 10^{16}$ эВ, а для второго — ливням с энергией около 10^{18} эВ. Данные для всех событий записывались на первичные носители, тип которых с течением времени менялся. До лета 1995 г. при начальной обработке формировалась рабочая база данных, в которую заносились ливни по определенным критериям. В качестве критерия использовалось требование, чтобы на трех станциях зарегистрированная плотность ливневых частиц превышала определенное пороговое значение. В разные годы критерии отбора несколько различались. С осени 1982 г. по лето 1995 г. пороговая плотность была равна 0.8 м^{-2} (больше трех частиц на всю площадь счетчиков в станции). С осени 1995 г. обработка и накопление организованы так, что для анализа возможно использовать зарегистрированные события в полном объеме.

В данной работе, как и в предыдущей [2], были

привлечены события за период с 1982 по 1995 гг. в диапазоне энергий от $3 \cdot 10^{16}$ эВ до $3 \cdot 10^{17}$ эВ с зенитным углом $\theta < 60^\circ$, которые удовлетворяют однородному критерию, т. е. имеются три станции с плотностью выше 0.8 м^{-2} . Внутри каждого отдельного года использовались данные, полученные за ноябрь — май месяцы. Но, в отличие от работы [2], в каждом периоде была использована эффективная площадь установки, контролируемая надежно работающими станциями наблюдения. Из всего массива данных этим критериям отвечают 135566 событий, что на 10% меньше, чем в [2]. Средняя энергия отобранных ливней равна $1.6 \cdot 10^{17}$ эВ (регистрируемая с максимальной частотой энергия — 10^{17} эВ), средний зенитный угол равен 24.2° . Для этой выборки проведен гармонический анализ распределения событий как по солнечному, звездному и антизвездному временам, так и по прямому восхождению (RA).

3. УЧЕТ НЕОДНОРОДНОСТИ УСЛОВИЙ ОБЗОРА НЕБА УСТАНОВКОЙ

Отключение установки по техническим и технологическим причинам чаще происходит днем, поэтому возможно неоднородное распределение таких отрезков по времени суток. На неоднородности обзора неба сказывается также изменение эффективной площади из-за временного выхода из строя отдельных станций наблюдения. На Якутской установке регулярно составляется список последовательных периодов, в которые отмечены моменты включения и отключения регистрации, а также дается информация о реально работающих в данный период станциях наблюдения. Любое изменение в конфигурации триггерной системы фиксируется как начало нового периода, даже если отключение установки не происходило. Для ливней, регистрируемых вблизи порога, эффективная площадь пропорциональна количеству треугольников в Триггере-500, реально отбирающих события. Чтобы определить степень относительной неоднородности обзора неба за полный срок выборки, для каждой отдельной минуты солнечных суток по всем дням регистрации подсчитывалось суммарное количество триггерных треугольников, которые в данную минуту отбирали события. Полученные значения нормировались на среднее по всем минутам. Из этих же периодов по солнечному времени легко получить аналогичные распределения по минутам звездного и антизвездного времени.

Неоднородность в обзоре по звездному време-

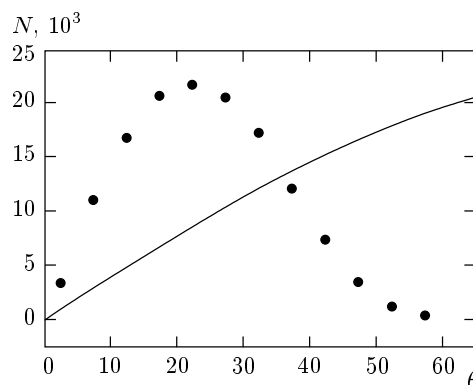


Рис. 2. Распределение ливней в анализируемой выборке по зенитному углу θ . Сплошная линия соответствует равномерному по небесной сфере распределению

ни приводит к неодинаковым условиям наблюдения для разных значений прямого восхождения, которые зависят от распределения по зенитному углу анализируемых событий и широты, на которой расположена установка. Для определения условий обзора неба по RA мы сначала получили зенитно-угловое распределение ливней. Это распределение показано на рис. 2. В расчете неоднородности обзора по RA сначала при фиксированном зенитном угле θ и фиксированном моменте звездного времени t_S определялся вклад для всех возможных значений RA при равномерном изменении азимута от 0 до 2π . Величина этого вклада пропорциональна значению в относительном распределении по звездному времени для момента t_S умноженному на количество ливней с данным θ . Для получения полного распределения проводилось суммирование таких вкладов по всем θ и t_S в каждом интервале по RA.

Для учета неоднородности обзора неба при определении параметров вектора анизотропии число событий в определенном минутном интервале времени или RA нормировалось на соответствующее значение в относительном распределении условий обзора.

В двух начальных колонках табл. 1 приводятся параметры векторов первой гармоники, характеризующие относительные распределения обзора неба для разных переменных, полученные из периодов работы установки за все время анализируемой выборки. Видно, что неоднородность значительна и амплитуда равна 1.74% даже для прямого восхождения. Если рассмотреть эти распределения отдельно по годам, то наблюдаются вариации как по амплитуде, так и по фазе. В разные годы количество триггерных треугольников менялось, поэтому мы при даль-

Таблица 1. Параметры первой гармоники для разных векторов (всего 135566 событий)

Вектор	Условия		Распределение событий			
	обзора неба		без учета обзора		с учетом обзора	
	$r, \%$	$\varphi, \text{ час}$	$r, \%$	$\varphi, \text{ час}$	$r, \%$	$\varphi, \text{ час}$
Солнечный	4.05	22.78	6.92 ± 0.39	22.75 ± 0.22	2.72 ± 0.39	22.48 ± 0.55
Звездный	2.30	8.98	3.93 ± 0.39	9.00 ± 0.38	1.62 ± 0.39	10.40 ± 0.92
Антизвездный	2.15	13.34	3.50 ± 0.39	12.44 ± 0.43	1.41 ± 0.39	10.82 ± 1.06
RA	1.74	8.11	2.89 ± 0.39	9.35 ± 0.52	1.36 ± 0.39	10.97 ± 1.10
Звездный-VAR			0.43 ± 0.55	8.51 ± 4.89	0.24 ± 0.55	11.96 ± 8.75
RA-VAR(RA)					0.45 ± 0.55	12.79 ± 4.67

Таблица 2. Изменение параметров первой гармоники для разных векторов в различные сезоны года

Месяцы	Число событий	Солнечный вектор			Звездный вектор		Вектор по RA	
		$r, \%$	$\varphi, \text{ час}$	$\varphi_S, \text{ час}$	$r, \%$	$\varphi, \text{ час}$	$r, \%$	$\varphi, \text{ час}$
11	14832	5.20	21.35	1.0	4.93	1.12	2.60	1.40
12-01	37605	1.78	1.18	7.9	2.00	8.17	1.12	6.08
02-03	40039	3.15	22.09	8.7	2.72	9.16	2.21	10.12
04-05	43090	3.07	22.66	13.3	3.02	13.03	2.83	12.74

нейшем анализе использовали индивидуальные для каждого года поправки.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Полученные амплитуды (r) в процентах и фазы (φ) в часах для векторов первой гармоники по солнечному, звездному, антизвездному временам и прямому восхождению приведены в табл. 1 как с учетом влияния неоднородности обзора небесной сферы установкой, так и без него. Из этих результатов видно, что, во-первых, неоднородность условий наблюдения для разного времени суток за рассматриваемый период работы Якутской установки была значительной ($\approx 4\%$) и ее учет существенно уменьшает амплитуду для всех переменных и, во-вторых, даже с учетом такой неоднородности для данной выборки остается значимая анизотропия с амплитудой ($2.72 \pm 0.39\%$) по солнечному времени и значительное влияние сезонных вариаций, что видно по амплитуде антизвездного вектора ($1.41 \pm 0.39\%$).

Вектор, возникающий из-за сезонных вариаций и

дающий вклад в наблюдаемый результат по звездному времени, обозначим **VAR**. Он зеркально симметричен антизвездному вектору относительно солнечного, т. е. равен антизвездному по модулю и имеет фазу

$$2 \cdot \varphi_{Sol} - \varphi_{Anti},$$

где φ_{Sol} — фаза солнечного вектора и φ_{Anti} — фаза для антизвездного вектора. В предпоследней строке табл. 1 приводится оценка анизотропии первичного излучения по звездному времени после вычитания вектора **VAR**. Амплитуда получилась меньше одной σ как без учета, так и с учетом неоднородного обзора неба. На рис. 3 приводится взаимное расположение всех векторов, полученных с учетом влияния неоднородного обзора неба.

Вклад сезонных вариаций в суммарный вектор по прямому восхождению **VAR(RA)** можно оценить так же, как рассчитывалось относительное распределение обзора неба по RA. В этом расчете используется тоже экспериментальное распределение ливней по зенитному углу, а вес неоднородности по звездному времени в момент t_S задается исходя из пара-

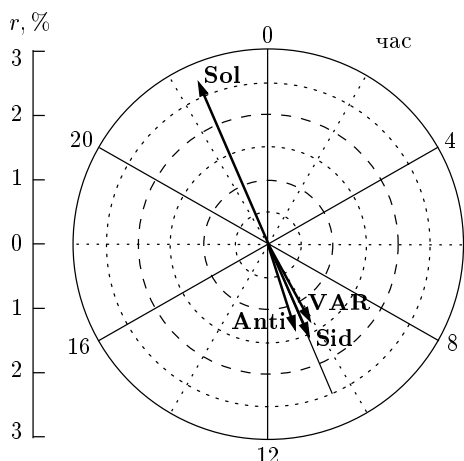


Рис. 3. Взаимное расположение векторов анизотропии для разных переменных: **Sol** — солнечный вектор, **Sid** — звездный, **Anti** — антивзвездный, **VAR** — вклад атмосферных вариаций в **Sid**

метров, полученных для вектора **VAR**. В последней строке табл. 1 приводится результат для прямого восхождения, полученный после вычитания рассчитанной атмосферной составляющей. Амплитуда также, как и в анализе по звездному времени, меньше σ .

Кроме того, для данной выборки мы провели аналогичный анализ по отдельным месяцам года. Результаты этого рассмотрения представлены в табл. 2, где приводятся наблюдаемые параметры с учетом неоднородности обзора неба. В колонке φ_s для солнечного вектора приводится фаза в звездном времени, которая соответствует солнечной фазе для середины данного сезона. Из этой таблицы видно, что фазы как звездного вектора, так и вектора по прямому восхождению для разных сезонов меняются в соответствии с изменением направления солнечного вектора в звездных координатах. Это подтверждает, что основной вклад в наблюдаемую амплитуду по RA дают сезонные вариации атмосферного происхождения. После учета всех факторов для данной выборки не наблюдается статистически значимой анизотропии первичного излучения при 10^{17} эВ. В предыдущей работе [2] мы не учитывали вклад атмосферных вариаций, поэтому и получили значимую амплитуду.

В данный момент уточняется список периодов работы установки для последних лет и завершается

восстановление данных для всех событий до 1995 г., не попавших в рабочую базу из-за критериев отбора. Это даст возможность продолжить детальный анализ по полной выборке из более 10^6 событий, распределение которых по звездному времени можно использовать для оценки анизотропии вблизи 10^{17} эВ.

5. ВЫВОДЫ

Полученные в данной работе результаты указывают, что при анализе данных для исследования анизотропии необходимо принимать во внимание неоднородность условий обзора неба, которая может возникать из-за кратковременных отключений установки или изменения ее эффективной площади. Кроме того, вблизи порога регистрации в наблюдаемый вектор по прямому восхождению вносит вклад сезонная вариация частоты событий атмосферного происхождения. Этот вклад можно оценить по данным для вектора по антивзвездному времени и зенитно-угловому распределению ливней. Амплитуда первой гармоники по RA с учетом искажающих факторов получилась равной $(0.45 \pm 0.55)\%$, поэтому истинная анизотропия первичного излучения по данным Якутской установки в области 10^{17} эВ с вероятностью 0.95 меньше 1.25%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 98-02-17725 и 00-15-96787).

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Linsley, Phys. Rev. Lett. **34**, 1530 (1975).
2. А. А. Михайлов, М. И. Правдин, Письма в ЖЭТФ **66**, 305 (1997).
3. В. П. Артамонов, Б. Н. Афанасьев, А. В. Глушков и др., Известия РАН, сер. физическая **58**, 92 (1994).
4. R. N. Coy, J. Lloyd-Evans, M. Patel et al., Proc. 17th ICRC, Paris (1981), Vol. **9**, p. 183.
5. F. J. Farley and J. R. Storey, Proc. Phys. Soc. A **67**, 996 (1954).