

УДК 524.1-352:539.1.05

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКА МЮОНОВ

© 2013 г. В. В. Шутенко, И. И. Астапов, Н. С. Барбашина, А. Н. Дмитриева,
Р. П. Кокоулин, К. Г. Компаниец, А. А. Петрухин, И. И. Яшин

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, г. Москва

e-mail: VVShutenko@mephi.ru

Поступила в редакцию 28.06.2012 г.

После доработки 19.11.2012 г.

Интенсивность потока атмосферных мюонов зависит от множества факторов: энергетического спектра первичных космических лучей, состояния гелиосферы, магнитосферы и атмосферы Земли. Широкоапертурный мюонный годоскоп УРАГАН (Москва, Россия, 55.7° N, 37.7° E, 173 м н. у. м.) дает возможность исследовать не только вариации интенсивности потока мюонов, но и временные изменения параметров его углового распределения, для анализа которых используется вектор локальной анизотропии, а также его проекции, которые проявляют различную чувствительность к параметрам процессов модуляции как первичных космических лучей в гелиосфере и магнитосфере Земли, так и вторичных космических лучей при прохождении их через земную атмосферу. Вектор локальной анизотропии является суммой единичных векторов (направлений реконструированных треков мюонов), нормированной на количество треков. В работе представлены результаты анализа долговременных вариаций среднечасовых значений проекций вектора локальной анизотропии, полученных на основе данных годоскопа УРАГАН в течение 2007–2011 гг.

DOI: 10.7868/S0016794013050155

1. ВВЕДЕНИЕ

Первые эксперименты по регистрации космических лучей (КЛ) на поверхности Земли показали наличие сильных суточных колебаний интенсивности их потока. В работе [Wollan, 1939] отмечалось, что в экспериментах наблюдаются явные периоды в вариациях интенсивности КЛ: суточный, 27-дневный и годовой. Дорманом и Фейнбергом [1956] были систематизированы все, известные на то время, знания о вариациях КЛ. В работе [Briggs et al., 1969] по исследованию солнечно-суточных вариаций мюонной компоненты на уровне моря анизотропия ее потока понималась в виде амплитуды и фазы первой (24 ч) и второй (12 ч) гармоник по Фурье-анализу солнечно-суточных отклонений интенсивности на протяжении 540 дней. В работах [Belov, 2000; Belov et al., 2006] для анализа долговременных вариаций интенсивности и анизотропии галактических космических лучей использовались данные всемирной сети нейтронных мониторов.

Новые возможности в исследовании вариаций космических лучей открыло создание первых мюонных годоскопов ТЕМП [Борог и др., 1995] и УРАГАН [Барбашина и др., 2008]. В данной работе анализируются результаты, полученные на годоскопе УРАГАН, который представляет собой установку из четырех независимых супермодулей. Каждый супермодуль состоит из восьми плоско-

стей стримерных трубок с резистивным катодом, продуваемых газовой смесью $Ag + CO_2 + n$ -пентан. Стримерный режим работы обеспечивается подбором высокого напряжения и состава газовой смеси. По сторонам каждой плоскости располагаются взаимно ортогональные алюминиевые стрипы (320 + 288 штук), которые образуют восемь XY-координатных плоскостей. Каждый супермодуль имеет площадь ~ 11.5 м². Годоскоп УРАГАН расположен на поверхности Земли и регистрирует угловое распределение потока мюонов с пороговыми энергиями от 0.2 до 0.6 ГэВ в диапазоне зенитных углов 0–80°. Угловая точность реконструкции треков $\sim 1^\circ$. Угловое распределение реконструированных треков частиц сохраняется в виде минутных матриц M с ячейками размером 1° по зенитному углу θ и 4° по азимутальному углу φ . Матричный способ хранения информации позволяет проводить анализ углового распределения в различных диапазонах зенитных и азимутальных углов. Для анализа долговременных вариаций использовались среднечасовые данные в диапазоне зенитных углов $25^\circ \leq \theta < 76^\circ$. Средняя энергия первичных протонов, формирующих поток мюонов в этом диапазоне углов, составляет ≈ 80 ГэВ, медианная энергия ≈ 60 ГэВ.

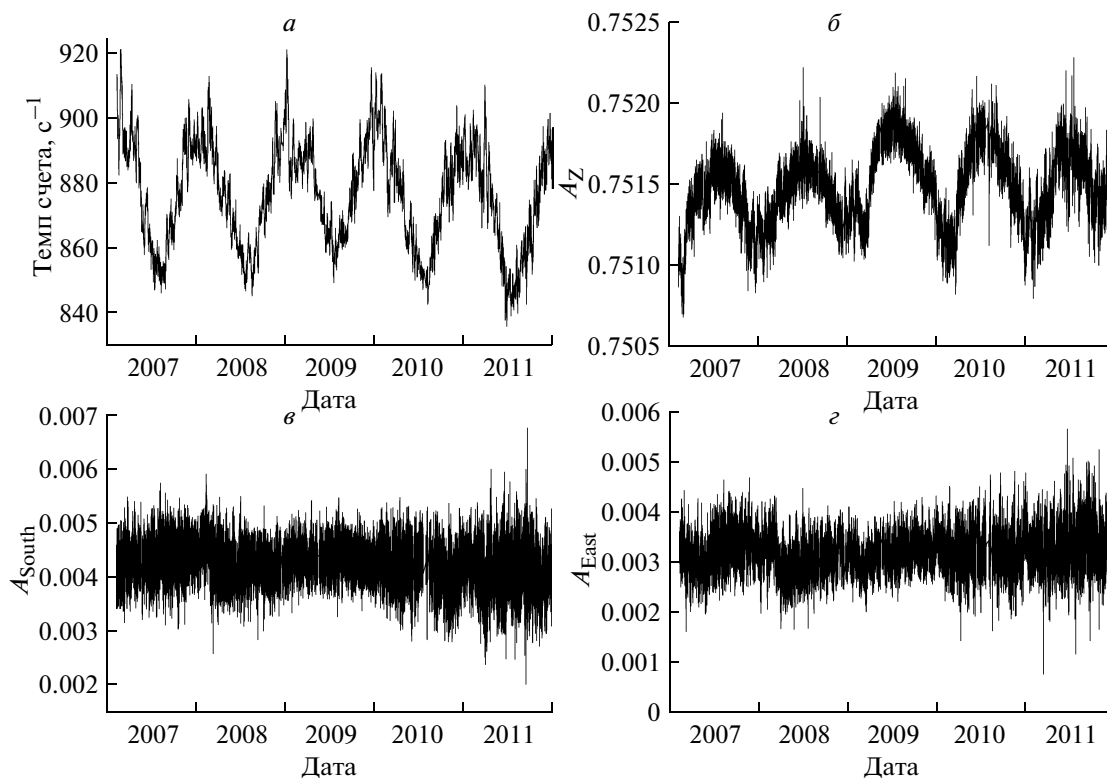


Рис. 1. Временные ряды среднесуточных значений темпа счета годоскопа УРАГАН и проекций вектора локальной анизотропии в диапазоне зенитных углов $25-76^\circ$: *a* – темп счета (в пересчете на один супермодуль); *б* – вертикальная проекция A_Z ; *в* – проекция на ось север–юг A_{South} ; *г* – проекция на ось запад–восток A_{East} .

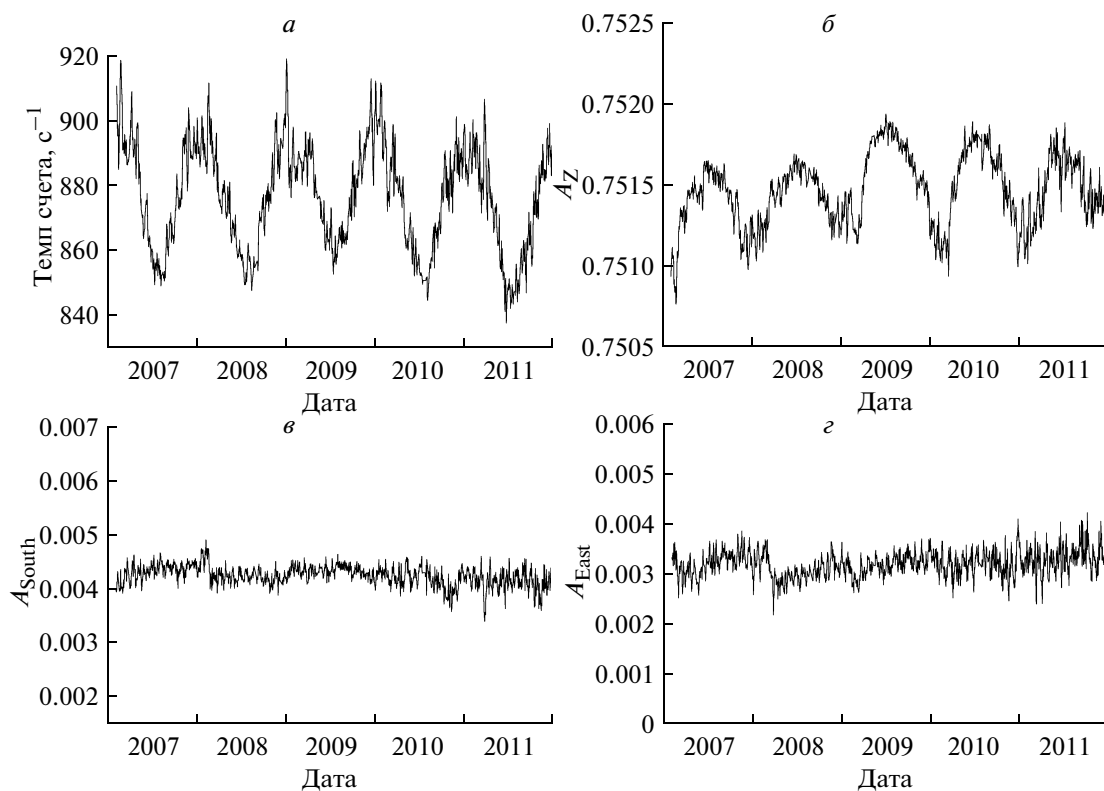


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для среднесуточных значений темпа счета годоскопа УРАГАН и проекций вектора локальной анизотропии.

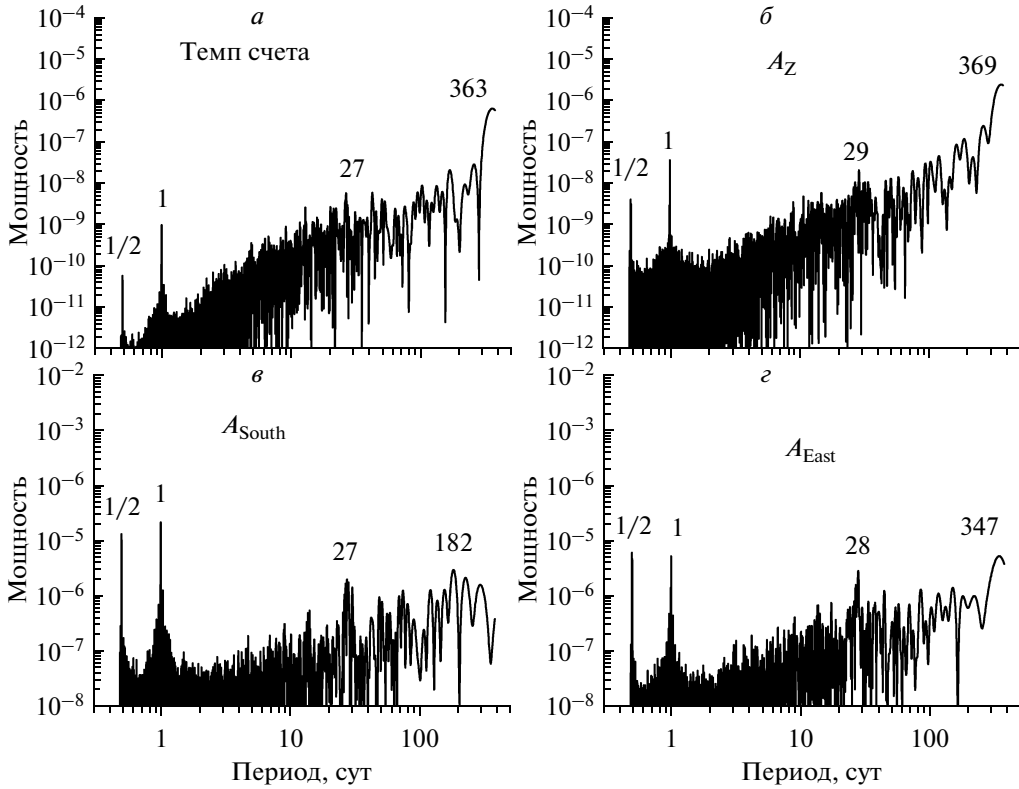


Рис. 3. Фурье-спектр мощности временных рядов темпа счёта и проекций вектора локальной анизотропии. Вверху: слева – темп счёта; справа – A_Z . Внизу: слева – A_{South} ; справа – A_{East} . Числами указаны значения периодов в сутках для соответствующих пиков.

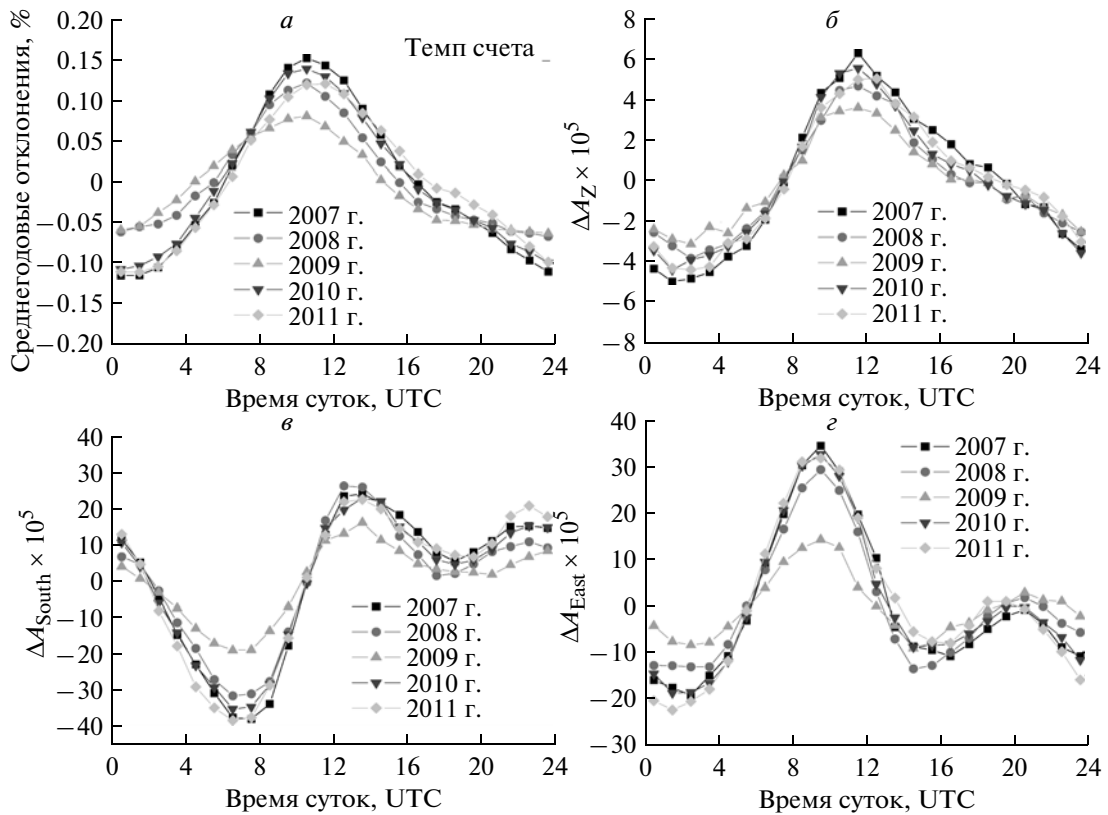


Рис. 4. Среднегодовые отклонения темпа счёта и проекций вектора локальной анизотропии в течение суток для 2007–2011 гг.: а – темп счёта; б – A_Z ; в – A_{South} ; г – A_{East} .

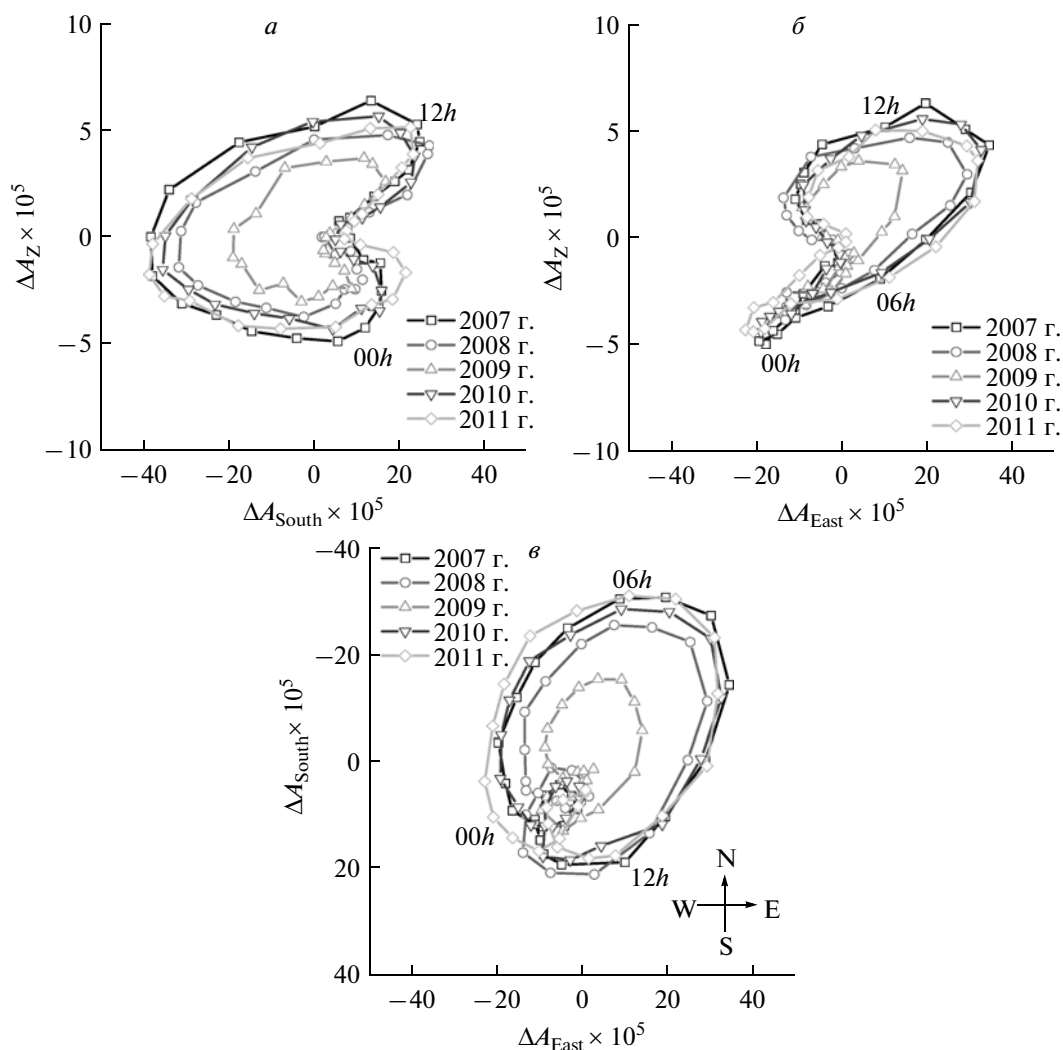


Рис. 5. Корреляции среднегодовых суточных отклонений для 2007–2011 гг.: *a* – A_Z и A_{South} ; *b* – A_Z и A_{East} ; *c* – A_{South} и A_{East} (направления на стороны света приведены в правом нижнем углу графика). Для некоторых точек числами на графиках приведено время суток в UTC.

2. ВЕКТОР ЛОКАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ

Длительное время исходными данными для исследования вариаций КЛ были только временные ряды темпа счета детектора. При этом система сбора данных детектора после каждого события лишь прибавляла единицу к счетчику событий. Но, если детектор позволяет получать вектор направления прилета зарегистрированной частицы, то можно применить векторную сумму. Суммарный вектор (вектор локальной анизотропии) будет характеризовать угловое распределение зарегистрированных частиц.

Проекции вектора локальной анизотропии (A_{South} , A_{East} , A_Z) по исходным матричным данным M , в общем виде можно определить так:

$$\begin{aligned}
 A_{\text{South}} &= \frac{1}{N} \sum_{\theta} \sum_{\varphi} M(\theta, \varphi) \cos \varphi \sin \theta, \\
 A_{\text{East}} &= \frac{1}{N} \sum_{\theta} \sum_{\varphi} M(\theta, \varphi) \sin \varphi \sin \theta, \\
 A_Z &= \frac{1}{N} \sum_{\theta} \sum_{\varphi} M(\theta, \varphi) \cos \theta, \\
 N &= \sum_{\theta} \sum_{\varphi} M(\theta, \varphi),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где: θ , φ – зенитный и азимутальный углы для середины ячеек матрицы; $M(\theta, \varphi)$ – количество зарегистрированных событий, попавших в ячейку (θ, φ) матрицы M ; N – полное число событий в исследуемом диапазоне углов; A_{South} – проекция

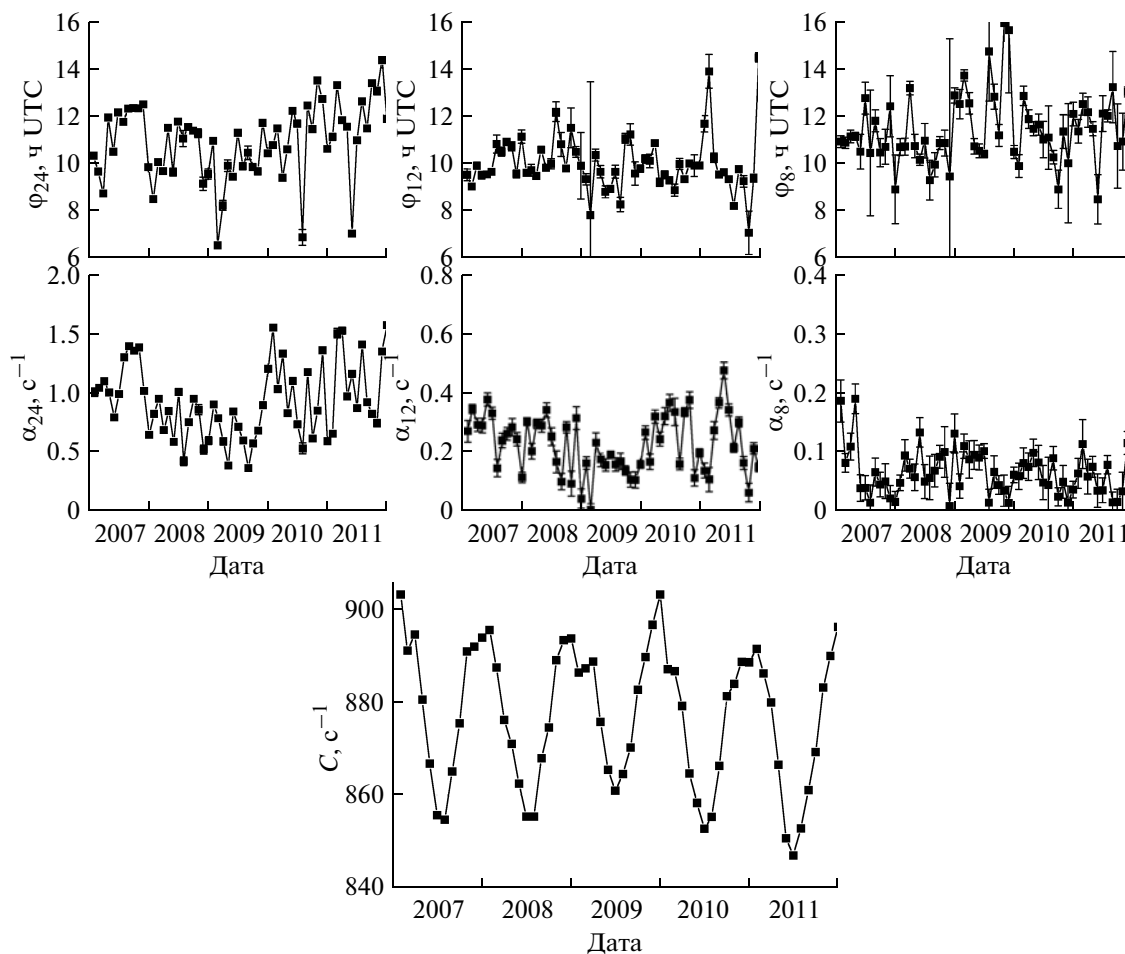


Рис. 6. Изменения во времени амплитуд и фаз 24-, 12- и 8-часовых гармоник (вверху) и коэффициента C (внизу) среднемесячных суточных отклонений темпа счета.

на ось север–юг; A_{East} – проекция на ось запад–восток; A_Z – вертикальная проекция.

При обработке экспериментальных данных для вычисления значений горизонтальных проекций A_{South} и A_{East} используются исходные матрицы M без дополнительных барометрических и температурных поправок. В числителях системы (1) для A_{South} и A_{East} эти поправки уничтожаются при сложении значений с противоположных азимутальных углов, а использование поправок в суммарной величине (N) практически не влияет на результат. При вычислении A_Z используются значения матрицы $M(\theta, \varphi)$ с барометрическими поправками. К сожалению, корректное введение поправок на температурный эффект как в темп счета, так и в величину A_Z требует информации о температурном разрезе атмосферы, которая, как правило, отсутствует, либо носит фрагментарный характер. Подробно вопрос о введении поправок на температуру с использованием дифференциальных температурных коэффициентов рассмотрен нами в работе [Dmitrieva et al., 2011].

На угловое распределение потока мюонов могут влиять локальные атмосферные возмущения (грозы, ливни и т.п.). При этом в зоне атмосферной чувствительности (радиусом до 100–150 км) атмосферное давление и температурный разрез могут быть сильно неравномерными. В такие моменты невозможно получить корректные данные по атмосферному давлению и по температурному разрезу. Можно лишь наблюдать, как изменяется вектор локальной анизотропии, что является предметом отдельных исследований. Но, как правило, атмосферные возмущения кратковременны и нерегулярны, поэтому использование вектора локальной анизотропии предоставляет уникальные возможности для анализа долговременных вариаций потока мюонов, обусловленных внеатмосферными процессами.

3. ВРЕМЕННЫЕ РЯДЫ

Для анализа долговременных вариаций углового распределения были использованы часовые матрицы угловых распределений трех супермоду-

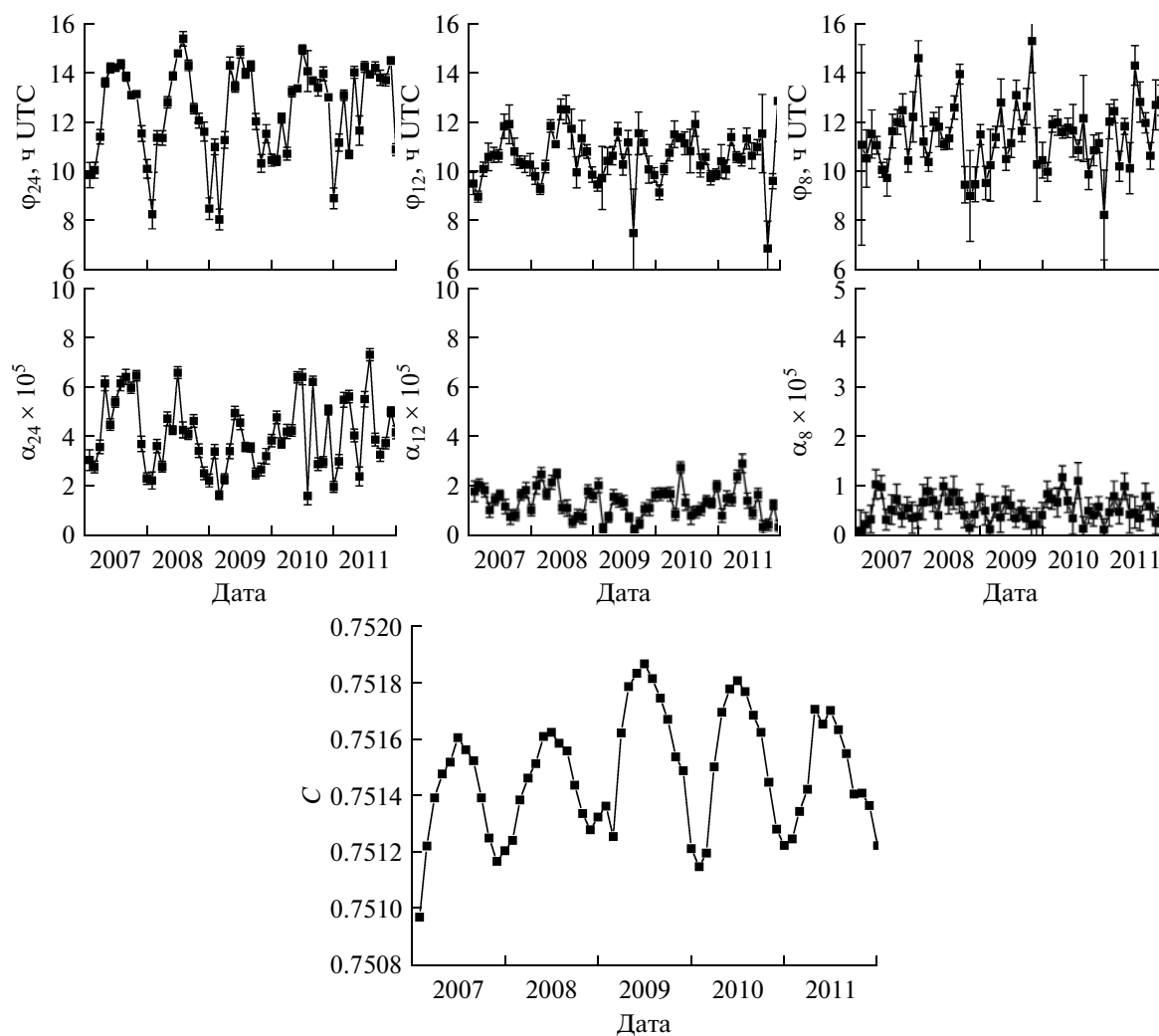


Рис. 7. То же, что и на рис. 6, но для среднемесячных суточных отклонений A_z .

лей, входящих в состав годоскопа УРАГАН. Вектор локальной анизотропии вычислялся в диапазоне зенитных углов $25^\circ \leq \theta < 76^\circ$, так как данные в этом интервале более устойчивы, по сравнению с околоразвернутым направлением, к изменениям эффективности регистрации детектора, которые могли иметь место на протяжении длительного времени. На рисунке 1 представлен временной ряд темпа счета событий (в пересчете на один супермодуль) в исследуемом диапазоне зенитных углов с барометрической коррекцией и временные ряды проекций вектора локальной анизотропии: вертикальной (A_z) и двух горизонтальных (на ось север–юг — A_{South} и на ось запад–восток — A_{East}).

Сильные суточные вариации несколько затрудняют восприятие, поэтому на рис. 2 представлены временные ряды среднесуточного темпа счета и среднесуточных значений проекций.

Наблюдаемый на рисунках 1 и 2 годовой ход темпа счета, в основном, обусловлен температурным эффектом, но годовые изменения значений

вертикальной проекции A_z , по-видимому, не могут быть объяснены только изменением температуры атмосферы, так как форма годовых изменений темпа счета и A_z различна. К тому же годовой ход A_z идет в противофазе с изменениями темпа счета. По сравнению с темпом счета и вертикальной проекцией во временных рядах горизонтальных проекций вектора локальной анизотропии не наблюдается отчетливых годовых изменений, хотя вариации A_{East} в 2008–2009 гг. имеют слабо выраженную пилообразную форму. Статистический анализ работы детектора не выявил каких-либо методических причин, которые могли бы объяснить такую особенность вариации A_{East} .

Фурье-анализ временных рядов темпа счета и проекций вектора локальной анизотропии показывает, что спектры частот для них отличаются (рис. 3).

На рисунке 3 видно, что общим для вариаций темпа счета и проекций вектора является суточ-

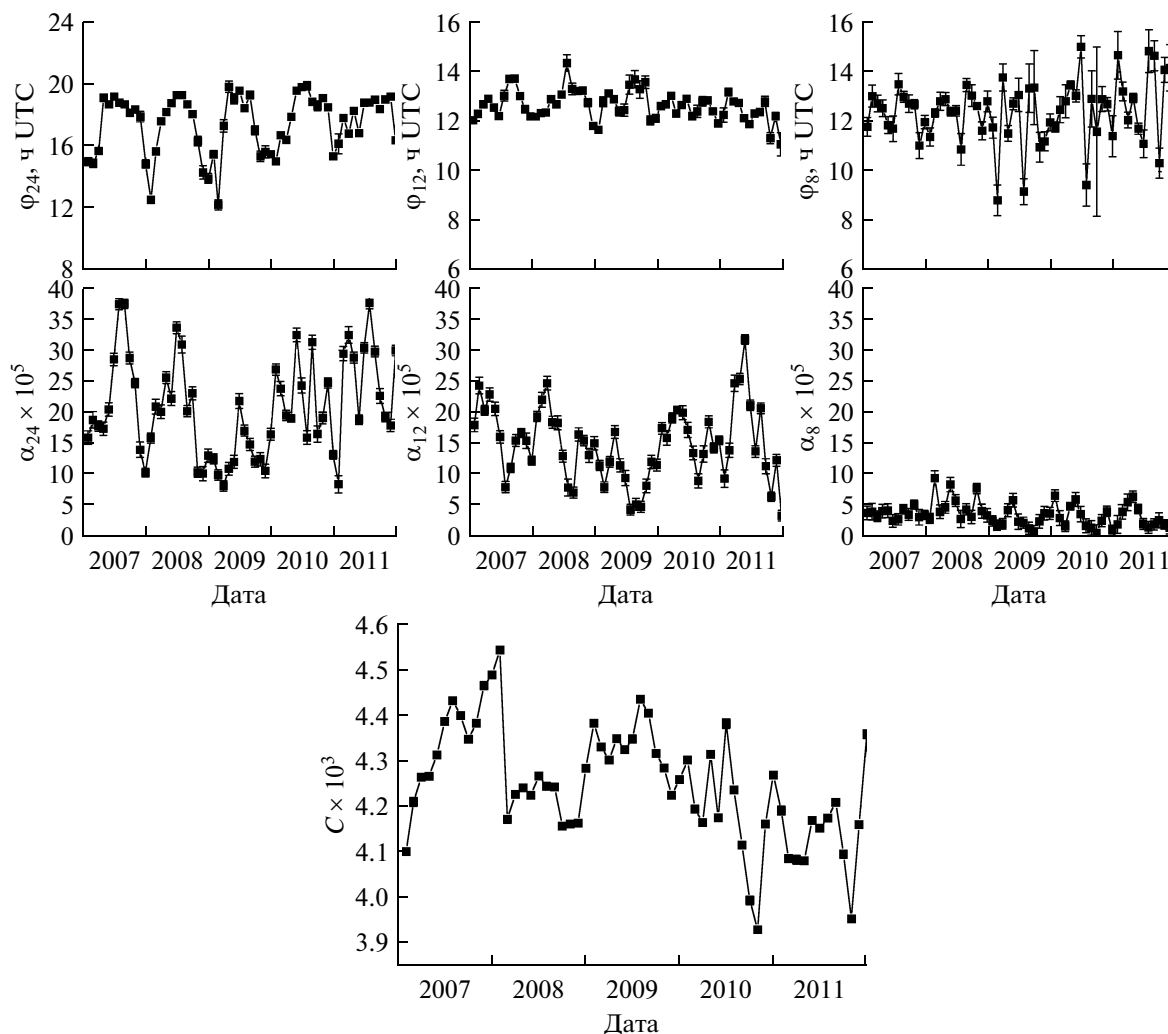


Рис. 8. То же, что и на рис. 6, но для среднемесячных суточных отклонений A_{South} .

ный и примерно 27-суточный периоды. Полусуточный период сильнее проявляется в вариациях горизонтальных проекций. 27-суточный период менее всего заметен в вариациях темпа счета и A_z . На больших периодах спектр вариаций A_{South} имеет отличающийся от других спектров характер. На спектре A_{South} выделяется околополугодовой период, а на остальных спектрах доминируют периоды, хотя и несколько отличающиеся, но близкие к годовому.

Таким образом, в вариациях вектора локальной анизотропии и, следовательно, углового распределения потока мюонов, наблюдаются все известные периоды, обусловленные вращательными движениями Земли, Луны и Солнца.

4. СУТОЧНЫЕ ОТКЛОНЕНИЯ

Наличие сильных суточных колебаний в вариациях проекций вектора локальной анизотропии на протяжении всего периода наблюдений позво-

ляет провести их подробное исследование. На рисунке 4 представлены суточные изменения проекций вектора локальной анизотропии и темпа счета относительно их средних значений за год. На рисунке 4 видно, что суточные изменения темпа счета и A_z подобны и синфазны в отличие от их годовых изменений (см. рис. 1), а характер суточных изменений A_{East} и A_{South} сильно отличается от вариаций темпа счета и A_z . Стоит отметить уменьшение магнитуды суточных отклонений в 2009 г., соответствующем минимуму солнечной активности.

На рисунке 5 представлены годографы взаимной корреляции между проекциями вектора локальной анизотропии. Видно, что суточные изменения значений проекций сильно коррелируют между собой, а кольцеобразная форма корреляций стабильна и сохранялась на протяжении 2007–2011 гг. По местному времени маленькая петля на рис. 5в соответствует околополуночным

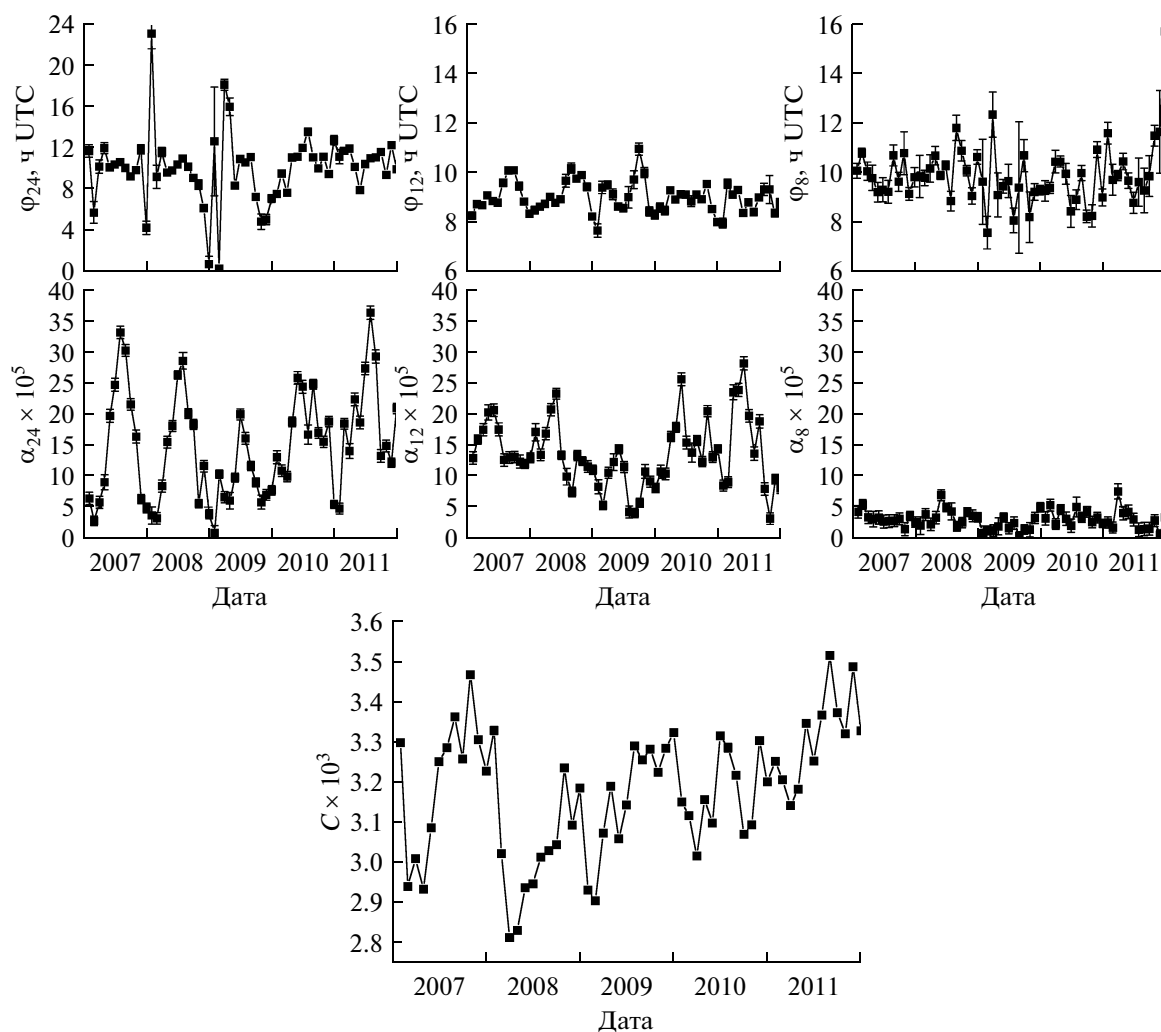


Рис. 9. То же, что и на рис. 6, но для среднемесячных суточных вариаций A_{East} .

часам, а максимум отклонения — околополуденным часам.

5. ГОДОВЫЕ ВАРИАЦИИ ГАРМОНИК СУТОЧНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ

Для анализа динамики суточного цикла в течение 2007–2011 гг. было проведено помесечное усреднение часовых значений темпа счета и проекций в зависимости от времени суток h_{day} . Затем для каждого месяца суточные отклонения аппроксимировались методом наименьших квадратов суммой трех гармоник:

$$\begin{aligned}
 F(h_{day}) = & C + \alpha_{24} \cos\left(\frac{h_{day} + 0.5 - \varphi_{24}}{24} 2\pi\right) + \\
 & + \alpha_{12} \cos\left(\frac{h_{day} + 0.5 - \varphi_{12}}{12} 2\pi\right) + \\
 & + \alpha_8 \cos\left(\frac{h_{day} + 0.5 - \varphi_8}{8} 2\pi\right),
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

где: h_{day} — время суток в часах UTC; C — базовое значение; α_{xx} — амплитуда гармоники; φ_{xx} — фаза в часах UTC.

На рисунках 6–9 представлены результаты аппроксимации среднемесячных суточных изменений темпа счета и проекций вектора локальной анизотропии с 2007 по 2011 гг.

Для темпа счета (рис. 6) годовой ход хорошо проявляется в слагаемом C в течение 2007–2011 гг., а в изменениях фазы 24-часового колебания (от 8 до 13 ч UTC) — в течение 2007 и 2008 гг.

Для вертикальной проекции A_Z (рис. 7) годовой ход проявляется в течение 2007–2011 гг. в коэффициенте C , в течение 2007–2010 гг. — в изменениях фаз 12- и 24-часовой составляющих (9–13 и 8–15 часов UTC соответственно), а в течение 2007–2008 гг. — в изменении амплитуды 24-часовой составляющей.

Для горизонтальной проекции A_{South} (рис. 8) в течение 2007–2011 гг. годовой ход практически не

проявляется в коэффициенте C , но хорошо виден в изменении фазы 24-часовой составляющей (12–20 часов UTC). В течение 2007–2009 гг. годовой ход заметен в изменении фазы 12-часовой составляющей (12–14 часов UTC) и амплитуды 24-часовой составляющей.

Для горизонтальной проекции A_{East} (рис. 9) в течение 2007–2008 гг. годовой ход проявляется в коэффициенте C , в изменении фазы 12-часовой составляющей (8–10 часов UTC) и амплитуды 24-часовой составляющей.

Амплитуды 12- и 24-часовой составляющих в целом за 2009 г. имеют меньшее значение по сравнению с другими годами.

Для 8-часовой гармоникой годовые зависимости параметров аппроксимации по всем характеристикам не просматриваются.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мюонные годоскопы позволяют использовать для анализа не только темп счета событий, но и угловое распределение зарегистрированных частиц. В качестве количественной характеристики при исследовании углового распределения потока мюонов целесообразно использовать вектор локальной анизотропии. Анализ вариаций вектора локальной анизотропии в диапазоне зенитных углов $25^\circ \leq \theta < 76^\circ$ по данным годоскопа УРАГАН за 2007–2011 гг. показал наличие годового, полугодового, 27-суточного и суточного хода. Наблюдаются устойчивые суточные корреляции между горизонтальными проекциями вектора локальной анизотропии. С ростом солнечной активности, в 2010 и 2011 гг., наблюдается нарушение регулярности долговременных вариаций. Вариации вектора локальной анизотропии и темпа счета имеют различный характер. Таким образом, использование для анализа вектора локальной анизотропии расширяет возможности исследований

зависимости потока мюонов от различных гелиосферных, магнитосферных и атмосферных процессов.

Работа выполнена в Научно-образовательном центре НЕВОД на уникальной установке ЭК НЕВОД (гос. контракт № 16.518.11.7053) при поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” и гранта ведущей научной школы НШ-6817.2012.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барбашина Н.С. и др. Широкоапертурный мюонный годоскоп большой площади УРАГАН // Приборы и техника эксперимента. № 2. С. 26–32. 2008.
- Борог В.В., Буринский А.Ю., Дронов В.В. Мюонный годоскоп для исследования солнечно-земных связей в области энергий больше 10 ГэВ // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 59. № 4. С. 191–194. 1995.
- Дорман Л.И., Фейнберг Е.Л. Вариации космических лучей // Успехи физ. наук. Т. 59. № 6. С. 189–228. 1956.
- Belov A. Large scale modulation: view from the Earth // Space Sci. Rev. V. 93. № 1–2. P. 79–105. doi:10.1023/A:1026584109817. 2000.
- Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A., Yanke V.G., Mavromichalaki H. Long-term variations of the cosmic ray anisotropy by the data from world wide neutron monitor network // Proc. 20th ECRS. <http://www.lip.pt/events/2006/ecrs/proc/ecrs06-s0-123.pdf>. 2006.
- Briggs R.M., Hicks R.B., Standil S. Periodic solar time variations in the cosmic-ray muon component near sea level // J. Phys. A: Gen. Phys. V. 2. P. 584–590. 1969.
- Dmitrieva A.N., Kokoulin R.P., Petrukhin A.A., Timashkov D.A. Corrections for temperature effect for ground-based muon hodoscopes // Astroparticle Physics. V. 34. P. 401–411. doi:10.1016/j.astropartphys.2010.10.013. 2011.
- Wollan E.O. Present Status of solar and sidereal time variation of cosmic rays // Rev. Mod. Phys. V. 11. P. 160–165. doi:10.1103/RevModPhys.11.160. 1939.