

УДК 523.9

GSE-ОТОБРАЖЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКА МЮОНОВ, РЕГИСТРИРУЕМОГО ГОДОСКОПОМ УРАГАН, В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

© 2019 г. И. И. Яшин¹, *, И. И. Астапов¹, Н. С. Барбашина¹, А. Н. Дмитриева¹,
К. Г. Компаниец¹, А. А. Петрухин¹, В. В. Шутенко¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ”, Москва, Россия

*E-mail: IYashin@mephi.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

Мюонный годоскоп УРАГАН (Москва, 55.7° N, 37.7° E, 173 м н.у.м.) непрерывно регистрирует угловое распределение потока мюонов в широком диапазоне зенитных и азимутальных углов, что позволяет получать информацию о вариациях его интенсивности и угловых характеристик. В статье приводится метод выявления областей анизотропии в угловом распределении мюонов и их отображения в матричном виде в GSE-системе координат. При этом определяются следующие характеристики выделенных областей: максимальная глубина (высота) деформации, зенитный и азимутальный угол центра области в локальной системе, долгота и широта в GSE-системе. Временной график GSE-долгот выделенных областей публикуется в Интернет и может использоваться для мониторинга гелиосферной активности.

DOI: 10.1134/S0367676519050405

ВВЕДЕНИЕ

Мюонный годоскоп УРАГАН [1], состоящий из четырех супермодулей, предназначен для регистрации потока атмосферных мюонов в широком диапазоне зенитных углов (от 0° до 80°). В режиме непрерывной регистрации используются три супермодуля (СМ): СМ1, СМ3 и СМ4 (площади регистрации 11.02, 10.73 и 10.73 м² соответственно). Данные о двумерном угловом распределении мюонов записываются в виде непрерывных одноминутных кадров. Время начала и конца кадра каждого СМ задается по минутным меткам системы ГЛОНАСС. В начале каждого кадра проводится мониторинг регистрирующей системы, а затем регистрация потока мюонов. “Живое” время регистрации T_{live} составляет 87–89% от полного времени кадра и зависит от интенсивности потока мюонов [2].

1. ФОРМАТ ДАННЫХ ГОДОСКОПА УРАГАН

При реконструкции трека частиц определяют проекционные углы (θ_y и θ_x), а также зенитный и азимутальный углы (θ и φ) в лабораторной системе координат (азимутальный угол направления на юг: $\varphi_{\text{South}} = 34.726^\circ$).

Для подсчета количества зарегистрированных и реконструированных треков по отдельным направлениям используются матрицы двух типов с размерностью 91 × 91 ячеек: $M[\theta, \varphi]$ и $M[\text{tg}\theta_y, \text{tg}\theta_x]$. Ячейки матрицы $M[\theta, \varphi]$ имеют фиксированные угловые размеры: $\Delta\theta = 1^\circ$, $\Delta\varphi = 4^\circ$. Для ячеек матрицы $M[\text{tg}\theta_y, \text{tg}\theta_x]$ размер фиксирован в тангенсах проекционных углов: $\Delta\text{tg}\theta_{y, x} = \text{tg}80^\circ/45.5$, центральная ячейка этой матрицы соответствует вертикальному направлению. Данные минутных кадров отдельных супермодулей, содержащих результаты мониторинга, данные датчика атмосферного давления, матрицы угловых распределений и “живое” время регистрации собираются в общий минутный кадр годоскопа УРАГАН, сохраняются и используются для последующей обработки.

Барометрическая коррекция количества событий в ячейках часовых и 24-часовых матриц проводится с учетом среднего атмосферного давления в этих временных интервалах и индивидуальных для каждого супермодуля барометрических коэффициентов, зависящих от зенитного угла. После барометрической коррекции матрицы отдельных супермодулей суммируются, и формируются объединенные часовые и 24-часовые матрицы. Так как проекционные углы θ_y и θ_x у СМ1,

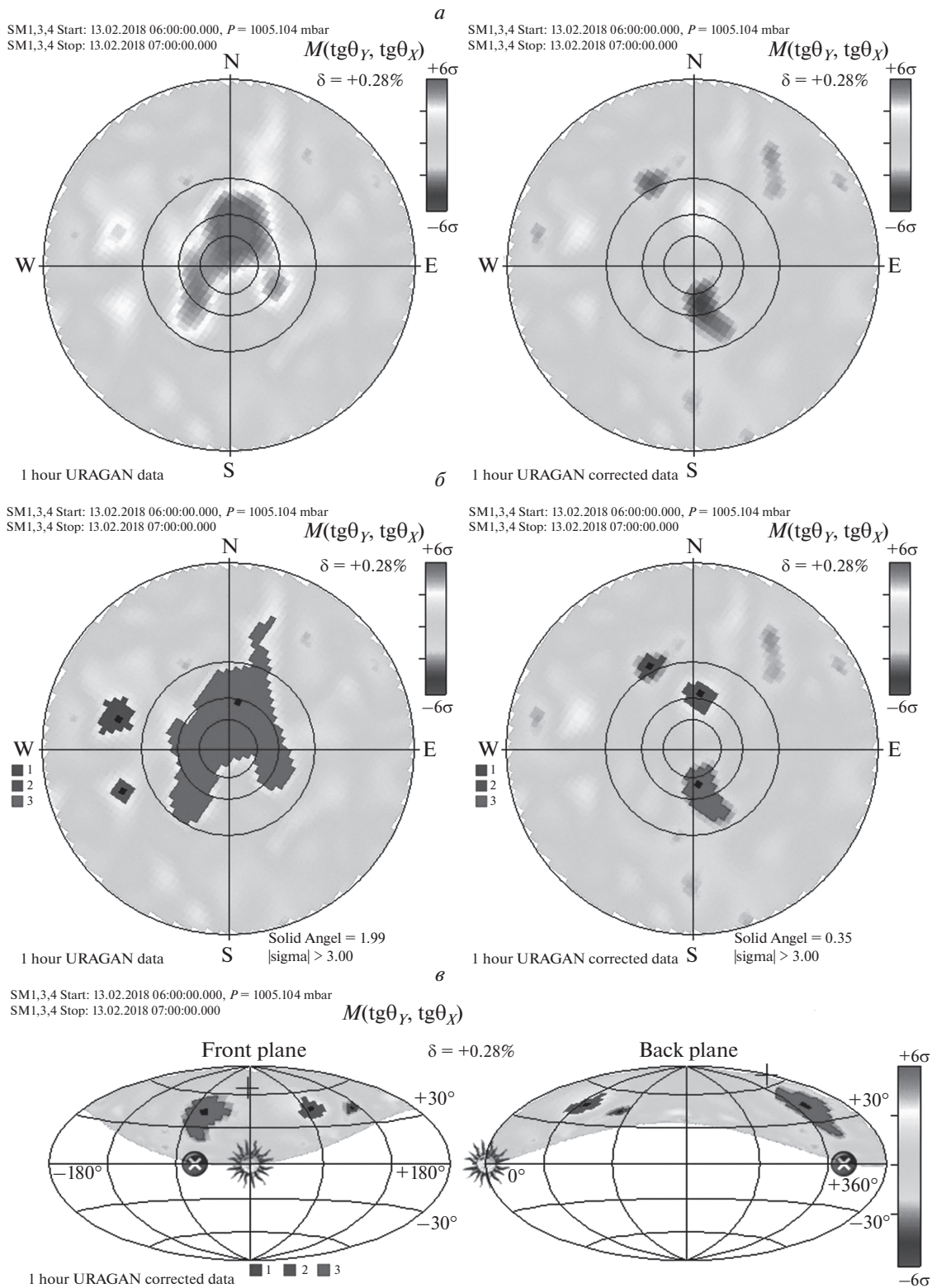


Рис. 1. Последовательно сверху вниз: *a* – часовые матрицы изменений углового распределения зарегистрированного потока частиц в единицах статистической погрешности. Слева – без коррекции формы углового распределения, справа – с коррекцией; *б* – те же часовые матрицы с выделенными областями деформаций; *в* – GSE-отображение матрицы изменений потока частиц с коррекцией углового распределения и выделенными областями деформации.

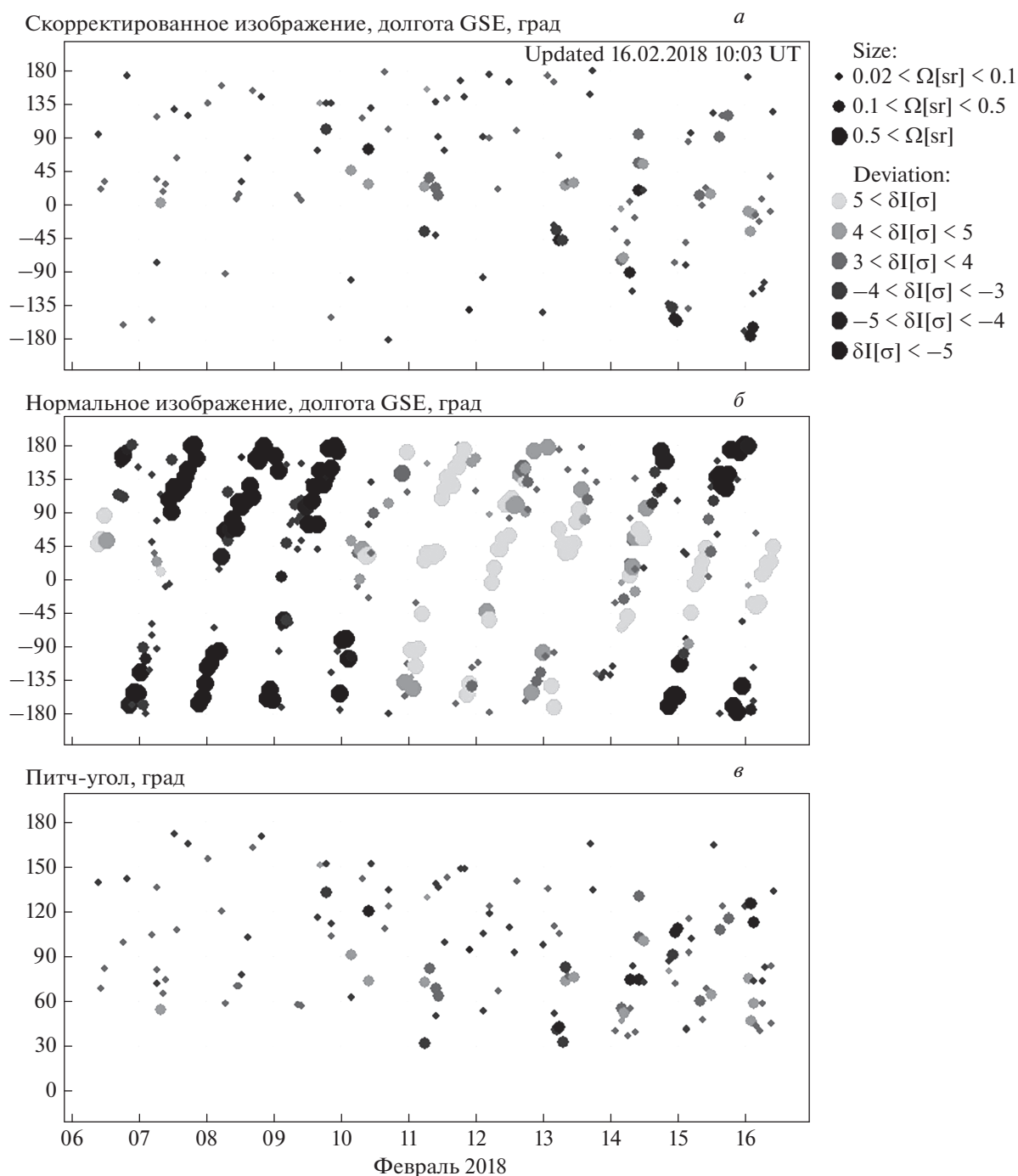


Рис. 2. GSE-долготы пиковых значений областей деформаций, выделенных по матрицам изменений: *a* – с коррекцией углового распределения; *б* – без коррекции; *в* – питч-углы пиковых значений областей деформаций, выделенных по матрицам изменений с коррекцией углового распределения.

СМ3 и СМ4 направлены по-разному (из-за индивидуальной ориентации системы координат супермодулей), то перед объединением матрицы для СМ1 и СМ4 переориентируются по θ_y и θ_x одинаковым образом с СМ3.

В дальнейшем используются только объединенные матрицы. Проводится аппроксимация

объединенных часовых матриц $M[\theta, \varphi]$ и 24-часовых матриц $M_N[\theta, \varphi]$ функцией вида $C \cos^\alpha \theta \Delta \Omega$ ($\Delta \Omega$ – телесный угол ячейки матрицы) в диапазоне зенитных углов от 0° до 76° . Результатом аппроксимации являются значения C , α и C_N , α_N . Объединенные матрицы $M[\text{tg}\theta_y, \text{tg}\theta_x]$ и $M_N[\text{tg}\theta_y, \text{tg}\theta_x]$ сглаживаются, формируется матрица изменений

углового распределения, в ячейках которой содержится отклонение числа событий в единицах статистической погрешности [2]. Дополнительно формируется матрица изменений с коррекцией формы углового распределения, для чего используются значения C , α и C_N , α_N (подробнее этот процесс описан в работе [2]). На рис. 1а и 1б представлены матрицы изменений без коррекции и с коррекцией. Затем на матрицах изменений выделяются области (не более десяти) с отклонением больше 3 сигм (рис. 1б). Эти области обозначаются как области деформаций.

2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ДАННЫХ В GSE-СИСТЕМУ КООРДИНАТ

С помощью предварительно рассчитанных асимптотических направлений угловые координаты ячеек матриц изменений из лабораторной системы отображаются в систему координат GSE (Geocentric Solar Ecliptic) [2] (рис. 1в).

Для каждой области деформации вычисляются: размер телесного угла в системе GSE, GSE-широта и GSE-долгота пикового значения отклонения и его величина в единицах статистической погрешности, пиковое значение деформации в процентах и его угловые координаты (θ , φ) в лабораторной системе координат. Временные ряды характеристик выделенных областей деформаций сохраняются. Эти ряды используются для построения графиков GSE-долготы направлений пиковых значений областей и питч-угла (угла в GSE-системе между направлением пикового значения области и направлением линии межпланетного магнитного поля при скорости солнечного ветра $400 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$) в зависимости от времени. Размер точек на графиках зависит от размера телесного угла области деформации, а цвет — от величины пикового значения отклонения внутри области. На всех графиках отображаются только области с размером телесного угла более 0.02 ср . На графиках с GSE-долготой отображаются только области с GSE-широтой менее 80° , на графиках с питч-углом отображаются области без ограничения по GSE-широте.

На рис. 2 представлены GSE-долготы пиковых значений найденных областей деформаций по матрицам изменений без коррекции (рис. 2б) и с коррекцией (2а) углового распределения с 6 по 16 февраля 2018 г. (12-го февраля 2018 г. на Солнце произошел корональный выброс масс, направленный в сторону Земли).

На рис. 2в представлены питч-углы пиковых значений найденных областей деформаций по матрицам изменений с коррекцией углового распределения с 6 по 16 февраля 2018 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью мюонного годоскопа УРАГАН можно отслеживать модуляции не только интегральной интенсивности потока мюонов и интегральных характеристик вектора анизотропии [2], но также анализировать во времени изменения внутри самого углового распределения потока мюонов, вызванные воздействиями неоднородностей межпланетного магнитного поля на поток заряженных первичных космических лучей. С помощью предложенного способа визуализации областей анизотропии в угловом распределении мюонов и их отображении в матричном виде в GSE-системе координат можно анализировать глубину деформации, зенитный и азимутальный углы центров областей в локальной системе, долготу и широту в GSE-системе. Временной ряд часовых кадров данных МГ УРАГАН дает возможность изучения динамики развития областей анизотропии и изучения вызвавших их процессов в гелиосфере.

Работа выполнена в Научно-образовательном центре НЕВОД при поддержке РНФ (грант № 17-17-01215).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барбашина Н.С., Кокорулин Р.П., Компаниец К.Г. и др. // ПТЭ. 2008. № 2. С. 26; Barbashina N.S., Kokorulin R.P., Kompaniets K.G. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2008. V. 51. № 2. P. 180.
2. Yashin I.I., Astapov I.I., Barbashina N.S. et al. // Adv. Space Res. 2015. V. 56. № 12. P. 2693.