

УДК 524.1-352

СОБЫТИЕ GLE73 (28.10.2021) В СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

© 2022 г. Ю. В. Балабин¹, *, Б. Б. Гвоздевский¹, А. В. Германенко¹,
Е. А. Маурчев¹, Е. А. Михалко¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
“Полярный геофизический институт”, Апатиты, Россия

*E-mail: balabin@pgia.ru

Поступила в редакцию 29.07.2022 г.

После доработки 15.08.2022 г.

Принята к публикации 22.08.2022 г.

Представлен результат анализа события GLE73 в солнечных космических лучах. Событие GLE73 вызвало возрастание счета на 2–6% на полярных станциях мировой сети нейтронных мониторов. С помощью разработанной методики выполнено прямое решение обратной задачи, получены энергетические спектры солнечных космических лучей на границе магнитосферы, а также питч-угловое распределение потока.

DOI: 10.31857/S0367676522120067

ВВЕДЕНИЕ

События GLE (Ground Level Enhancement) обусловлены эруптивными процессами на Солнце, сопровождающимися солнечными вспышками или корональными выбросами масс. Такие процессы часто приводят к генерации на Солнце и испусканию в межпланетное пространство энергичных частиц (SEP) (в основном, протонов) с энергиями до сотен МэВ. События GLE – это экстремальные случаи SEP, когда энергия протонов превышает 430 МэВ (1 ГВ) [1].

Первое событие GLE нового 25 цикла солнечной активности произошло 28.10.2021 и было отмечено как на космических аппаратах, так и наземными станциями мировой сети нейтронных мониторов (НМ). В основном это были НМ, имеющие атмосферную жесткость обрезания 1 ГВ или близкую к ней геомагнитную.

Стоит отметить, что новое событий GLE продолжает серию событий малой амплитуды, начавшуюся еще в середине 24 цикла. Однако, достаточное число станций, зарегистрировавших его с амплитудой более 1% (средний порог флуктуаций на стандартном НМ), позволяет провести анализ события с использованием разработанной методики без упрощений. Методика требует наличия данных минимального количества станций с амплитудой более 2% [2]. Это количество строго не установлено, зависит от амплитуды возрастания на НМ. Из опыта анализа многих событий GLE минимальное число НМ для корректной работы методики составляет около двух десятков.

СОБЫТИЕ 28.10.2021

Продолжительность события составила ~3 ч, максимальная амплитуда составила 6%. Наибольшая амплитуда отмечена на станциях Калгари и Форт Смит в Северной Америке. Нейтронные мониторы в Апатитах и Баренцбурге (Шпицберген) отметили амплитуду в 2–4%. Событие (ему присвоено обозначение GLE73) произошло от активной области A2887 типа Beta-Gamma с координатами S28W02, вспышка класса X1.0, максимум рентгеновского излучения достигнут в 15:35 UT, тип вспышки II/VI. Самое раннее начало события отмечено в 15:55 UT на станции Южный полюс. Событие GLE73 вызвало возрастание потока космических лучей на 2–6% на полярных НМ; низкоширотные станции возрастания не отметили. Что касается среднеширотных станций, то небольшое число НМ, асимптотические конусы приема которых располагались вблизи оси анизотропии, возрастание тоже зарегистрировали. Это в первую очередь НМ Калгари, расположенный на высоте 1200 м. Приведенные факты указывают на то, что спектр солнечных космических лучей (СКЛ) был мягким. Межпланетная и геомагнитная обстановка в течение суток, когда произошло событие GLE, была спокойной, Kp-индекс составлял 1, Dst-индекс находился около 0, скорость и плотность солнечного ветра были умеренными. Это означает, что конфигурация межпланетного магнитного поля (ММП) в целом соответствовала типичной паркеровской спирали.

Созданная и используемая нами методика определения параметров потока первичных про-

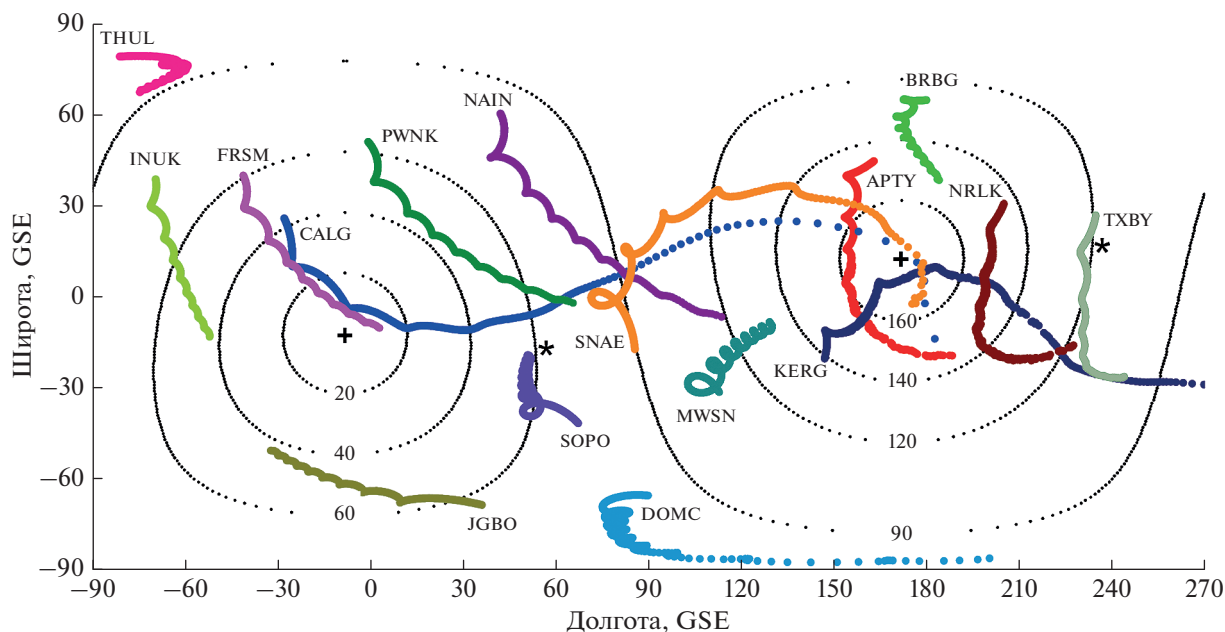


Рис. 1. Карта асимптотических конусов приема ряда высокоширотных станций для 17 UT. Обозначено: Thul – Туле, Inuk – Инувик, Frsm – Форт Смит, Calg – Калгари, Pwnk – Певанук, Jgbo – Джан Бого, Nain – Наин, SNAE – СА-НАЕ, SoPo – Южный полюс, Domc – Дом-Си, Mwsn – Моусон, Kerg – Кергелен, Apty – Апатиты, Brbg – Баренцбург, Nrlk – Норильск, Txby – Тикси. Знаками “+” обозначена вычисленная ось анизотропии СКЛ, знаками “*” – точки пересечения небесной сферы с осью ММП. Линии равных питч-углов показаны черными точками, числа около них показывают значение питч-угла.

тонов на границе магнитосферы требует расчета асимптотических конусов (АК) приема НМ с высокой точностью и с применением модели магнитосферы, наиболее точно описывающей состояние магнитосферы Земли. Использована хорошо зарекомендовавшая себя при анализе других событий GLE модель Цыганенко Т-01 [3], расчет АК выполнялся для всех станций в диапазоне жесткостей от атмосферного обрезания 1 до 20 ГВ. В нашей методике никакого усреднения и вычисления эффективной жесткости пенумбры (полутени) не производится, поскольку АК всех станций рассчитываются в указанном интервале жесткостей 1–20 ГВ с постоянным шагом 0.001 ГВ, а “запрещенные” жесткости (значения жесткости частиц, которые не способны проникнуть из межпланетного пространства к данной станции НМ) помечаются в специальном массиве и при вычислении отклика данного НМ исключаются из расчета. Такой путь устраняет ошибку, вносимую вычислением эффективной жесткости пенумбры, поскольку эта величина зависит от вида спектра, который до начала решения обратной задачи еще не известен. Рассчитанная нами карта асимптотических конусов приема ряда станций представлена на рис. 1. Названия станций помещены в края АК, соответствующего 20 ГВ. Положение оси анизотропии отмечено “+”, линии равных питч-углов показаны черными точками и указаны соответствующие значения

питч-угла. АК рассчитаны на 17:00 UT, использована модель магнитосферы Т-01.

В событии GLE73 станции НМ Калгари и Форт Смит имеют профили возрастания (рис. 2), типичные для GLE: довольно резкий фронт и медленный спад. Такое наблюдается, когда конусы приема станций оказываются вблизи оси анизотропии и принимают анизотропный поток, распространяющийся вдоль оси анизотропии с малым рассеянием и достигающий Земли первым. Плавное нарастание указывает на то, что станция принимает рассеянный поток частиц, плотность которого нарастает постепенно и с задержкой.

Небольшое число НМ располагается в горах. Из-за наличия барометрического эффекта амплитуда возрастания на этих станциях существенно больше, чем в случае расположения НМ на уровне моря в этой же географической точке. Это связано с тем, что эффективные длины пробега в атмосфере у галактических и солнечных космических лучей разные (~140 и ~100 г/см² соответственно); СКЛ сильнее поглощаются атмосферой [4]. Требуется приведение величины возрастания на разных высотах к единому барометрическому уровню. Поскольку большинство НМ располагаются вблизи уровня моря, за базовый уровень удобно взять 1000 мб. Приведение к одному барометрическому уровню проводится по методу двух

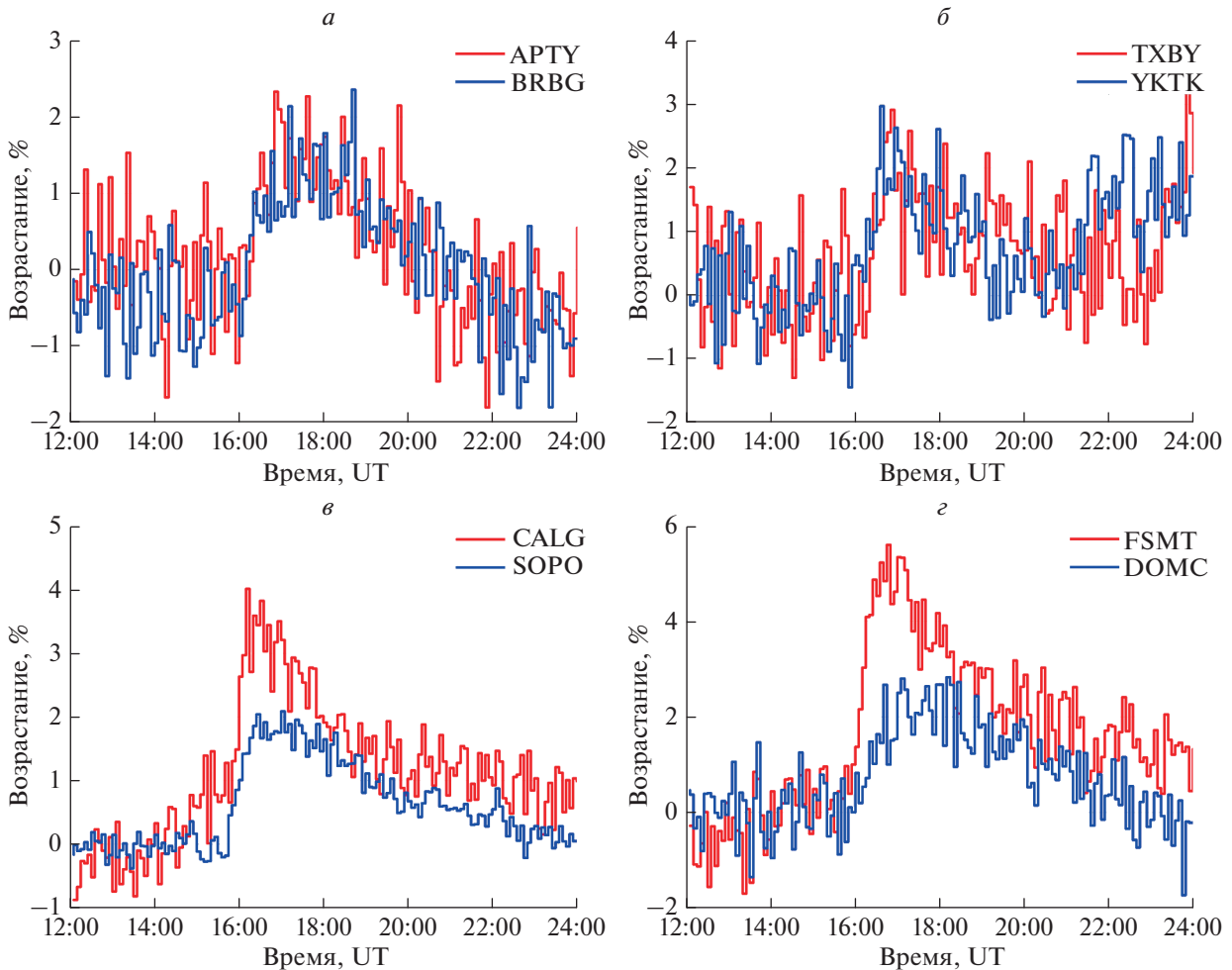


Рис. 2. Профили возрастания счета на станциях НМ: Apty – Апатиты, Brbg – Баренцбург (а), Txby – Тикси, Yktk – Якутск (б), Calg – Калгари, SoPo – Южный полюс и станция с наибольшей амплитудой возрастания, и станция с наибольшей амплитудой в событии GLE73 оказались Форт Смит и Певанук. Лишь после выполнения всех описанных процедур данные НМ могут быть использованы при решении обратной задачи.

длин ослабления [5]. Именно после внесения барометрической поправки НМ Южный полюс и Дом-Си перестали быть в числе станций с наибольшей амплитудой возрастания, и станция с наибольшей амплитудой в событии GLE73 оказались Форт Смит и Певанук. Лишь после выполнения всех описанных процедур данные НМ могут быть использованы при решении обратной задачи.

Несмотря на то, что средне- и низкоширотные НМ не показали возрастания потока СКЛ в событии GLE73, некоторое число НМ с нулевым возрастанием необходимо иметь в списке используемых станций. Такие станции с нулевым возрастанием задают лимит сверху на энергетический спектр СКЛ. Среднеширотные станции имеют протяженный АК, охватывающий у экватора более 180 градусов по долготе: наличие в потоке СКЛ частиц выше порога обрезания таких стан-

ций привело бы возрастанию потока на них. Используются российские и европейские среднеширотные НМ с жесткостью обрезания 3–5 ГВ: Новосибирск, Москва, Юнгфрау и др. Однако, избыток таких станций нежелателен, поскольку уменьшается средняя амплитуда возрастания (средняя по числу использованных НМ), уменьшается невязка, поиск минимума затрудняется. Поэтому низкоширотные станции Германус, Потшефсрум и др., которые заведомо не могли показать возрастания, при решении обратной задачи не использовались. Всего для анализа события отобраны 27 станций НМ, из них два десятка являются полярными и околополярными станциями.

От правильного вычисления АК зависит сходимость решения, поэтому требуется оценить соответствие установленных даты и времени, других параметров и вычисленных АК реальному положе-

нию Земли в пространстве. 17 UT соответствует повороту нулевого гринвичского меридиана на 75° в системе координат GSE от направления на Солнце. Апатиты располагаются на $\sim 35^\circ$ в.д. Снос протонов с жесткостью 10–20 ГВ в магнитосфере Земли составляет 40° – 60° в зависимости от состояния магнитосферы. В итоге АК Апатитов в области 10–20 ГВ должен располагаться в пределах долгот 150° – 170° . Межпланетное магнитное поле в спокойной обстановке протягивается от Солнца к Земле по паркеровской спирали. На орбите Земли угол касательной к этой спирали отстоит от направления на Солнце к западу на 30° – 60° в зависимости от скорости солнечного ветра. Также известно, что АК Кергелена и Апатитов всегда пересекаются при не слишком возмущенной магнитосфере. Все сказанное соответствует карте на рис. 1.

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

Определение параметров СКЛ, приходящих на границу магнитосферы из межпланетного пространства, производится путем решения обратной задачи по данным наземной сети НМ. Другими словами, подбираются такие характеристики потока СКЛ (энергетический спектр, питч-угловое распределение, направление прихода), чтобы рассчитанные по этим характеристикам возрастания (отклики) на мировой сети НМ имели наименьшее расхождение с теми, которые реально зарегистрированы. Общая методика решения обратной задачи впервые предложена в [6].

Стоит отметить важный момент в любой методике решения обратной задачи. Формы функциональных зависимостей, задающих связь характеристик, неявно определяют и точность получаемого решения, и сам вид этих зависимостей. К примеру, задание степенной формы спектра ограничивает возможные решения только степенными зависимостями, и в случае, когда реальный спектр СКЛ имеет другую форму (к примеру, экспоненциальную), любое полученное решение будет иметь большую ошибку, которую невозможно устранить оптимизацией алгоритма или подбором других параметров.

Поэтому следует задавать вид зависимостей в самом общем виде. В нашей методике реализован такой подход. Жесткостной спектр СКЛ $I(R)$ задается в виде:

$$I(R) = J_0 R^{-\gamma - \Delta\gamma(R-1)}, \quad (1)$$

где J_0 – поток СКЛ при $R = 1$, γ – показатель спектра, $\Delta\gamma$ – поправка спектра.

Такая форма задания спектра была предложена в [7] и активно применяется в наших работах (см. например, [8]). Она позволяет получать раз-

нообразные формы спектра. При $\Delta\gamma = 0$ получается степенной спектр. Эмпирически установлено, что для любого разумного значения R_0 существует пара таких значений $(\gamma, \Delta\gamma)$, что на конечном интервале жесткостей 1–20 ГВ функциональная зависимость (1) будет с хорошей точностью совпадать с экспонентой с характеристической жесткостью R_0 . Другие значения пары $(\gamma, \Delta\gamma)$ задают спектр, промежуточный между степенной и экспоненциальной формами.

Питч-угловое распределение СКЛ может иметь различную форму [9]. Наиболее простая форма питч-углового распределения (ПУР) имеет вид гауссиана и использовалась в [6], когда вычислительные возможности были скромными, однако, она не всегда соответствует условиям распространения и рассеяния СКЛ в межпланетном пространстве. В событиях GLE наблюдались ПУР с линейной зависимостью [10], с провалом на углах $\sim 90^\circ$, с дополнительным потоком из обратного (антисолнечного) направления. Последнее возможно, когда в межпланетном пространстве от Солнца вытягиваются магнитные петлевые структуры, как показано в [11, 12]. Как и при задании спектра, важно создать наиболее общую форму, которая при разном значении параметров может принимать различные виды функциональной зависимости: гауссиан, линейная форма, двунаправленная и др. Нами была выбрана следующая форма задания питч-углового распределения:

$$F(\theta) = \exp\left(\frac{-\theta^2}{c}\right) \cdot \left[1 - a \exp\left(\frac{-\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)^2}{b}\right) \right], \quad (2)$$

где θ – питч-угол, c – параметр, определяющий ширину ПУР, a множитель, стоящий в квадратных скобках, формирует особенность ПУР на углах, близких к 90° . Исследование выражения (2) показало, что возможности этой формы гораздо шире, чем просто формирование особенности на углах $\sim 90^\circ$. При этом все разнообразие форм ПУР достигается всего тремя параметрами. Комбинациями параметров (c, a, b) можно получить ПУР, имеющее линейную форму. При $a = 0$ выражение (2) приобретает вид простого гауссиана. При значениях $1 > a > 0$ и $b \ll c$ получается провал на питч-углах около 90° . При $a < 0$ в ПУР возникает “горб” около 90° . При $b \approx c$ возможно как смещение положения максимума ПУР с 0° на любой угол до 90° , если $a < 0$, так и линейное ПУР при $a > 0$. Выражение (2) использовалось при поиске решения обратной задачи для целого ряда событий GLE в [8, 11, 12].

Таблица 1. Параметры потока СКЛ в некоторые моменты времени

Время UT	J_0	E_0/γ	c	a	b	Ω	Φ
16:25	$3.12 \cdot 10^3$	0.58	5.4	0.86	4.88	5	13
16:30	$9.50 \cdot 10^2$	0.57	6.0	0.62	0.32	6	11
16:40	$1.87 \cdot 10^4$	0.34	7.9	0.75	7.01	-10	5
16:55	$3.70 \cdot 10^4$	5.3	9.9	0.58	1.51	3	-16
17:05	$9.80 \cdot 10^4$	5.6	10.4	0.84	6.36	-13	-11
17:45	$4.88 \cdot 10^4$	6.5	12.3	0.64	4.39	-15	-9

Окончательно выражение для вычисления отклика L -го НМ имеет вид:

$$\Delta N_L = \sum_{R=1}^{20} I(R) F(\theta_L(R)) S(R) A_L(R) dR, \quad (3)$$

где ΔN – возрастание на L -ой станции НМ, $S(R)$ – удельная функция сбора, заданная в табличном виде, $A_L(R)$ – массив, содержащий список разрешенных и запрещенных жесткостей для L -го НМ, который формируется при расчете АК. Суммирование ведется с тем же шагом по жесткости $dR = 0.001$ ГВ, как и расчет АК. Левая часть выражения является функцией от шести параметров (γ , $\Delta\gamma$, c , a , b , Ω , Φ). Углы Ω и Φ определяют положение оси анизотропии. Они неявно входят в (2), поскольку питч-угол определяется относительно некоторого направления, задаваемого углами Ω и Φ в сферической системе координат. Общая невязка по всей сети НМ выражается следующим образом:

$$G(\gamma, \Delta\gamma, c, a, b, \Theta, \Phi) = \sum_L (\Delta N_L(\gamma, \Delta\gamma, c, a, b, \Theta, \Phi) - \delta N_L)^2, \quad (4)$$

где δN_L – реально измеренное возрастание на L -ой станции НМ. G выражает сумму квадратов разностей между расчетным откликом НМ на поток СКЛ, заданный параметрами (γ , $\Delta\gamma$, c , a , b , Ω , Φ), и реальным возрастанием на НМ. Минимум функции G соответствует решению обратной задачи.

Поиск минимума многопараметрической функции является сложным делом, однако современные вычислительные возможности и новые численные методы позволяют получать вполне устойчивое решение выражения (4). Отметим, что исходя из предварительного анализа профилей возрастания, описанного выше, начальные значения параметров, перечисленных в функции G , могут быть установлены недалеко от точки минимума. Например, как было отмечено ранее, ось анизотропии находится между АК Инувика и Певанука вблизи АК Форга Смита и Калгари, показавших максимальное возрастание и резкий передний фронт. Это позволяет оставаться в обла-

сти устойчивого решения, облегчает и ускоряет поиск минимума выражения (4).

СПЕКТРЫ СКЛ

Для решения обратной задачи обычно используются пятиминутные данные НМ. Результатом является последовательность спектров и других параметров потока СКЛ в течение основного периода GLE, определенная с тем же пятиминутным шагом. Такая последовательность хорошо показывает динамику спектров СКЛ на протяжении GLE. Несмотря на то, что самое раннее начало возрастания отмечено в 15:55 UT, решение обратной задачи возможно выполнить только с 16:25 UT, потому что только к этому времени достаточное число НМ отметили амплитуду хотя бы в 2%. После 18:00 UT число станций, показавших достаточную для решения задачи амплитуду, снова стало меньше необходимого.

На рис. 3 представлены пересчитанные в энергетическую шкалу спектры СКЛ в некоторые моменты времени, а в табл. 1 даны численные значения параметров. Поток определен в единицах, указанных на графике спектров, во второй колонке приведена характеристическая энергия E_0 (ГэВ) или спектральный индекс γ ; значения E_0 стоят в колонке левее, а значения γ – правее), Ω и Φ приведены в градусах. На рис. 4 показаны питч-угловые распределения СКЛ.

Спектр в начале события (16:25 и 16:30 UT) имел экспоненциальную форму, затем начался переход к степенной форме спектра. Такое поведение соответствует большинству событий GLE, обработанных по нашей методике [11]. В 16:40 UT спектр еще экспоненциальный по форме, но существенно мягче: характеристическая энергия E_0 меньше. И далее ко времени достижения максимума к 17:00 UT спектр становится степенным. Интересно отметить, что, если судить по спектру, то поток в 16:30 UT уменьшился более чем в два раза. Однако, по ПУР видно, что уменьшение произошло только на малых питч-углах ($<40^\circ$), а на больших питч-углах уменьшение несущественное. Этому имеется простое объяснение: в случае кратковременной инжекции на Солнце движущиеся с малыми питч-углами частицы быстро достигли Земли единым сгустком и ушли дальше, что и показывает падение плотности потока на малых питч-углах, а рассеянные на больших питч-углах частицы медленнее дрейфуют вдоль линий ММП, расплывшись вдоль них. Также по ПУР видно, что после прохождения первого сгустка форма ПУР не меняется существенно, происходит только пропорциональное увеличение потока на всех углах с одновременным умягчением спектра.

На рис. 1 знаками “*” отмечено пересечение с небесной сферой прямой, вдоль которой расположен вектор ММП (назовем эту прямую “осью

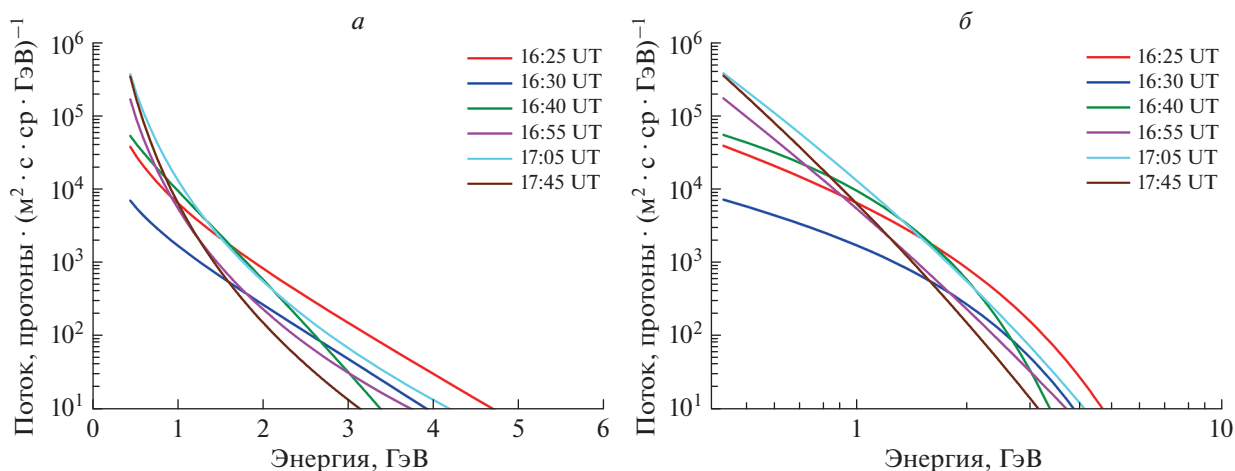


Рис. 3. Энергетические спектры СКЛ для характерных моментов времени в полулогарифмическом (*а*) и в двойном логарифмическом масштабе (*б*). Прямые линии на графике слева означают экспоненциальную зависимость. Прямые линии справа означают, что зависимость степенная.

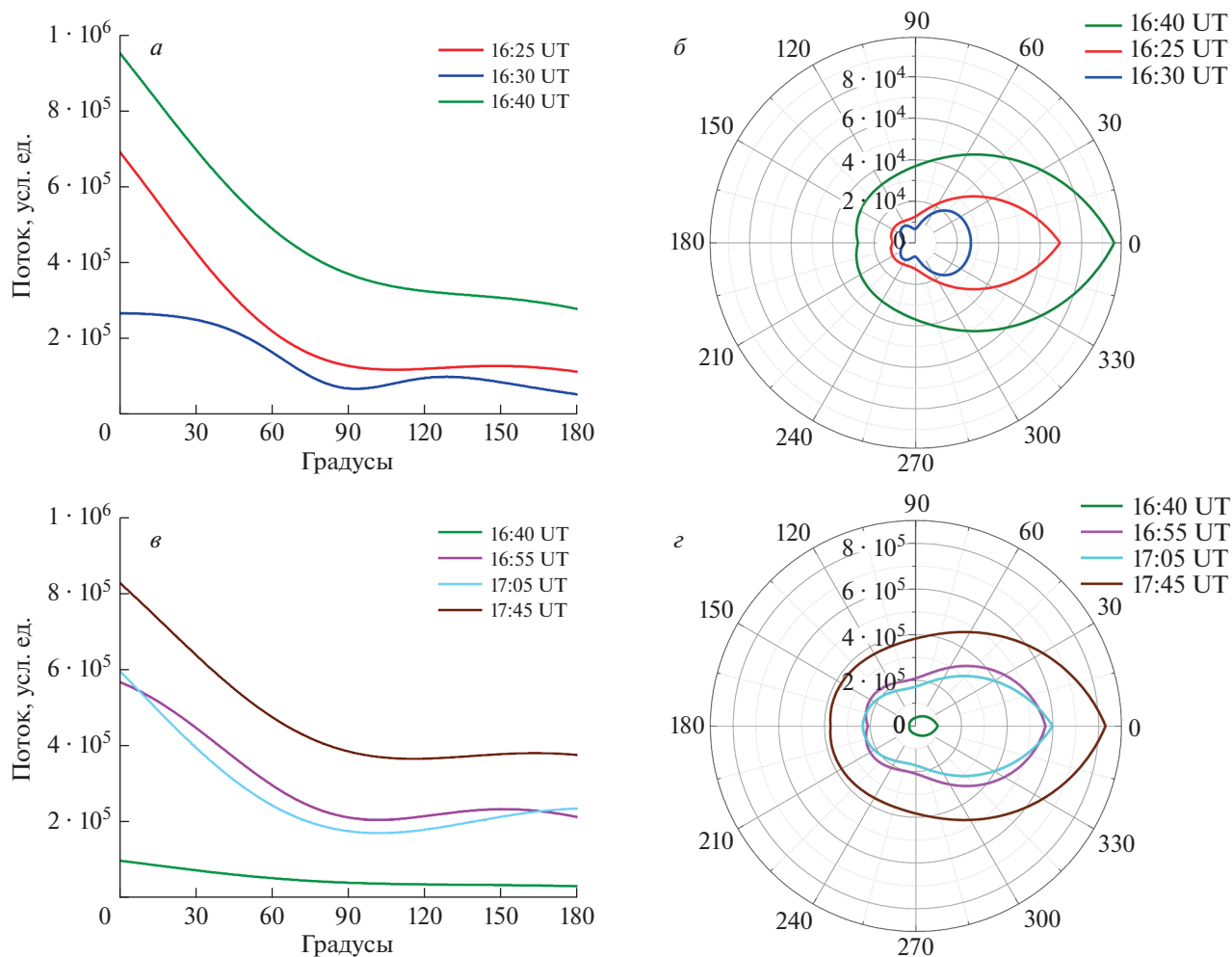


Рис. 4. Питч-угловые распределения потока СКЛ в 16:25, 16:30 и 16:40 UT в декартовых координатах (*а*); эти же ПУР в полярных координатах (*б*). Питч-угловые распределения СКЛ в 16:40, 16:55, 17:05 и 17:45 UT в декартовых координатах (*в*); эти же ПУР в полярных координатах (*г*). ПУР в 16:40 показано для соотнесения масштабов.

ММП”). Для распространяющихся в ММП протонов СКЛ направление вектора магнитного поля (от Солнца или к Солнцу) не имеет значения, важна силовая линия. Как видим, “ось ММП” располагается довольно далеко от вычисленной оси анизотропии. Причина в следующем. В течение второй половины дня 28 октября, как показывают данные АСЕ, напряженность ММП была слабой, всего ~ 3 нТл, компонента V_x сильно колебалась от -2 до 2 нТл, меняя знак, значение V_z держалось почти все время на положительных значениях, а V_y устойчиво имело отрицательные значения. При положительном V_x долгота “оси ММП” сместится к -60 градусам, при отрицательном — к 60 градусам. Именно это положение оси отражено на карте на 17 UT. К таким быстрым колебаниям направления вектора ММП поток СКЛ малочувствителен. Вычисления показывают, что ларморовский радиус протона с жесткостью 1 ГВ в магнитном поле 3 нТл составляет более миллиона км. Таким образом, на движение СКЛ, которые имеют жесткость от 1 до нескольких ГВ, эта мелкомасштабная структура ММП не сказывается.

В целом событие GLE73 рядовое. Оно не выделяется ни по своим параметрам, ни по формам профилей. В течение всего 24 цикла GLE тоже имели малую амплитуду, и GLE73 в новом 25 цикле продолжает эту серию.

Обращает на себя внимание линейная форма ПУР (на пичч-углах $<90^\circ$) в течение почти всего события. Подобное наблюдалось в событиях GLE70 13.12.2006 [8] и в GLE71 (17.05.2012), тогда как в событиях 2000–2005 гг. и ранее подобное встречается очень редко [11]. Причина может быть в особенностях источника на Солнце в момент инжекции частиц. Возможно, причина также в слабом межпланетном магнитном поле и его слабой возмущенности. Эта особенность ПУР может быть предметом отдельной задачи исследования состояния ММП по СКЛ. Напомним, что линейная форма ПУР при решении обратной задачи не задавалась; она возникает в результате особой комбинации параметров (c , a , b), определяющих общую форму ПУР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты анализа первого события 25 цикла в солнечных космических лучах (GLE73 28.10.21). Путем решения обратной задачи получены энергетические спектры и другие параметры потока солнечных космических лучей за пределами магнитосферы Земли на протяжении большей части события. GLE73 является рядовым событием. На начальной фазе спектр СКЛ имеет экспоненциальную форму, затем плавно переходит в степенной. Значения характеристической энергии $E_0 \approx 0.6$ ГэВ, показатель спектра равен $\gamma \approx 5.5$. Эти величины являются самыми типичными среди GLE [11].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-77-10018).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Miroshnichenko L.I.* // J. Space Weather Space Clim. 2018. V. 8. Art. No. A52.
2. *Miroshnichenko L.I., Klein K.-L., Trotter G. et al.* // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. Art. No. A09S08.
3. *Tsyganenko N.A.* // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. P. 1176.
4. *Дорман Л.И.* Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975, 462 с.
5. *Каминер Н.С.* // Геомагн. и аэрон. 1967. Т. 7. № 5. С. 806.
6. *Shea M.A., Smart D.F.* // Space Sci. Rev. 1982. V. 32. P. 251.
7. *Cramp J.L., Duldig M.L., Flückiger E.O. et al.* // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № A11. Art. No. 24237.
8. *Вашенюк Э.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Шур Л.И.* // Геомагн. и аэрон. 2008. Т. 48. № 2. С. 157.
9. *Bieber J.W., Evenson P.A., Pomerantz M.A.* // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. No. A8. P. 8713.
10. *Bieber J.W., Evenson P.A., Pomerantz M.A. et al.* // Astrophys. J. 1994. V. 420. P. 294.
11. *Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B.* // Astrophys. Space Sci. Trans. 2011. V. 7. P. 459.
12. *Балабин Ю.В., Вашенюк Э.В., Мингалев О.В. и др.* // Астроном. журн. 2005. Т. 82. № 10. С. 940.

GLE73 28.10.2021 event in solar cosmic rays

Yu. V. Balabin^a, B. V. Gvozdevsky^a, A. V. Germanenko^a, E. A. Mauricev^a, E. A. Michalko^a

^a Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia

*e-mail: balabin@pgia.ru

The result of the analysis of the GLE73 event in solar cosmic rays is presented. The GLE73 event caused an increase in the count by 2–6% at the polar stations of the world network of neutron monitors. With the help of the developed technique, a direct solution of the inverse problem was performed, the energy spectra of solar cosmic rays at the magnetosphere boundary, as well as the pitch-angle distribution of the flux, were obtained.