

УДК 524.1-352

АНАЛИЗ АНОМАЛЬНОГО СОБЫТИЯ GLE66 29 ОКТЯБРЯ 2003 г.

© 2023 г. Ю. В. Балабин*

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

*E-mail: balabin@pgia.ru

Поступила в редакцию 17.09.2022 г.

После доработки 05.10.2022 г.

Принята к публикации 26.10.2022 г.

Событие GLE66 (29.10.2003) является наименее изученным в серии из трех событий GLE, происшедших осенью 2003 г. Причиной этому сильнейшая магнитная буря и глубокий форбуш-эффект, во время которых произошло GLE66. Появление буревой модели магнитосферы T-05 и наличие отлаженной на десятках менее сложных событий GLE методики решения обратной задачи позволили вернуться к этому сложному событию. Получены значения параметров потока солнечных космических лучей в последовательные моменты времени. Наблюдается типичная для событий GLE картина: спектр солнечных космических лучей на начальной фазе имеет экспоненциальную форму, а далее переходит в степенную. Полученные спектры хорошо стыкуются с измерениями солнечных космических лучей на космических аппаратах в меньших энергиях.

DOI: 10.31857/S0367676522700466, EDN: AIPYVS

ВВЕДЕНИЕ

Во время сильных солнечных вспышек могут генерироваться солнечные космические лучи (СКЛ), которые испускаются с Солнца и вызывают возрастание потока космических лучей, регистрируемого наземными приборами. Такие события называют GLE (ground level enhancement). Они производятся солнечными космическими лучами с энергиями до 20 ГэВ. Состав СКЛ несколько отличается от галактических космических лучей, в них выше доля протонов и ядер гелия [1].

Осенью 2003 г. произошла серия вспышек на Солнце, сопровождавшихся генерацией и испусканием в межпланетное пространство высокоэнергичных частиц, которые регистрировались на Земле различными приборами: GLE65 (28.10.03), GLE66 (29.10.03) и GLE67 (02.11.03). Вспышка мощностью X17.2 произошла 28.10.03, достигла максимума в рентгеновских лучах в 11:10 UT, спустя несколько минут отдельные станции нейтронных мониторов (НМ) регистрировали возрастание, классифицированное как событие GLE. Во время этой вспышки, вероятно, произошла генерация энергичных нейтронов, которые были зарегистрированы на ст. Цумб в подсолнечной точке на поверхности земли [2]. Эта рентгеновская вспышка является сильнейшей с момента начала регистрации рентгеновского излучения от Солнца. Вспышка сопровождалась корональным выбросом масс, который ме-

нее чем через сутки (29 октября в 06 UT) достиг Земли и вызвал сильнейшую магнитную бурю [3]. Столь быстрый приход СМЕ к Земле на всю историю наблюдений отмечался всего несколько раз: скорость превысила 2000 км/с. *Dst*-индекс опустился до –400 нТл. В космических лучах наблюдался гигантский форбуш-эффект: поток космических лучей снизился на рекордное значение 27% (ст. Южный полюс [2]). Данные мировой сети нейтронных мониторов (НМ) показали близкие значения [4, 5]. В это время произошла новая вспышка мощностью X10.0, сопровождавшаяся генерацией СКЛ, и зарегистрировано новое событие GLE. Третье GLE случилось 2-го ноября, когда межпланетная обстановка и магнитосфера Земли вернулись в невозмущенное состояние. Последнее событие GLE наиболее простое из этой серии.

Эти события сразу привлекли внимание. Изучались условия генерации и распространения СМЕ, проводилось сравнение с СМЕ в других событиях как более ранних, так и последующих в 23 цикле [6, 7]. GLE изучались, анализировались, различными методиками определялись условия генерации и распространения СКЛ к Земле, определялись спектры и другие параметры потока СКЛ [2, 8–10]. В части СКЛ внимание фокусировалось на GLE65 и GLE67; а GLE66 оказалось трудным для анализа и моделирования. В первую очередь причиной является экстремально возму-

шенное состояние магнитосферы Земли на момент события GLE и сильный форбуш-эффект в КЛ.

Методики, предназначенные для определения спектра и других параметров потока СКЛ, можно разделить на два основных типа. Первые используют решение обратной задачи: определение параметров СКЛ на основе данных мировой сети НМ путем поиска таких значений параметров, чтобы рассчитанные величины возрастных (отклика) минимально расходились с тем, что реально измерено на НМ во время GLE. Методики этого типа не имеют жесткого ограничения на тип данных, обычно используются пятиминутные данные НМ, для которых флуктуации в 1% типичны, на некоторых НМ они даже больше. Соответственно, результатом является набор параметров СКЛ с тем же временным шагом, представляется возможность изучить динамику СКЛ в течение GLE. Второй тип использует иной подход. Мировая сеть НМ принимается как всенаправленный и единый спектрометр, в котором каждый НМ является интегральным измерителем потока СКЛ от пороговой жесткости R_c и выше [11, 12]. Эти методики требуют часовых данных, у которых флуктуации существенно меньше. Для относительно быстропротекающего процесса, как GLE, длительность которого может составлять всего 2–3 ч, часовое усреднение будет грубым, динамика спектра будет выражена слабо.

Для первого типа требуется точное вычисление асимптотического конуса (АК) приема каждого НМ в диапазон жесткостей 1–20 ГВ. АК вычисляются путем расчета движений пробных заряженных частиц, выпускаемых из точки расположения НМ, в магнитосфере Земли до ее покидания. Если частице какой-либо жесткости R не удастся покинуть магнитосферу, и она оказывается на замкнутой траектории внутри, то такая жесткость для данного НМ запрещена. Для расчета движений частиц требуется точное знание состояния магнитосферы в любой точке. Для второго типа методик точный расчет АК не требуется, достаточно знания R_c и приближенное положение АК.

Поэтому весьма полезно было бы применить методику первого типа к GLE66, чтобы проследить за динамикой параметров потока СКЛ во время такого неординарного события, сравнить их с другими GLE. В настоящее время такая возможность имеется: буревая модель магнитосферы T-05 удовлетворительно описывает состояние магнитосферы во время магнитных бурь [13]; созданная нами методика развивалась и улучшалась в процессе анализа десятков событий GLE [14], в ней использованы наиболее общие формы задания функциональных зависимостей для спектра и питч-углового распределения (ПУР).

СОБЫТИЕ 29.10.2003

Форбуш-понижение началось днем 29.10.03 с приходом к Земле коронального выброса масс (СМЕ), происшедшего днем ранее 28.10.03 во время предыдущей сильнейшей вспышки. Форбуш-понижением или форбуш-эффектом называется уменьшение потока КЛ, вызванное попаданием Земли в обширное облако плазмы, испущенной Солнцем [1]. Наличие в облаке магнитного поля тормозит диффузию космических лучей (КЛ) внутрь облака, отчего плотность потока КЛ внутри облака ниже. Примерно в 18 UT поток КЛ, регистрируемых на станциях Апатиты и Баренцбург, снизился ~25% от уровня КЛ накануне. На этом фоне произошла новая вспышка 2В/X10.0 в активной области с координатами S15W02, начало радиовсплеска II типа отмечено в 20:42 UT. Радиовсплеск II типа означает появление в солнечной атмосфере энергичных электронов. Наземное возрастание, вызванное СКЛ и обозначенное как GLE66, началось примерно в 21:00 UT. О времени начала поговорим ниже. Наибольшая амплитуда зарегистрирована на ст. Тикси и Мак-Мёрдо, она составила 17–18% по пятиминутным данным. На ст. Апатиты и Баренцбург возрастание отмечено на уровне 7–8%.

Наибольшую сложность для анализа события по нашей методике, относящейся к первому типу, является расчет АК в сложных условиях. Использовалась буревая модель магнитосферы T-05. Расчет АК выполнялся для всех станций в диапазоне жесткостей от атмосферного обрезания 1 ГВ до 20 ГВ. В нашей методике усреднения и вычисления эффективной жесткости пенумбры (полутени) не производится. 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. Вид АК (рис. 1) показывает, что магнитосфера находилась в крайне нетипичном состоянии. Обычное расположение АК и их вид можно найти в [8, 15], например. Многие полярные станции имеют в АК повторяющуюся структуру наподобие сужающихся витков спирали (пример подобного есть на рис. 1 у ст. Певанук). АК полярных станций преимущественно вытягиваются от высоких широт к экватору. В этом событии АК целого ряда НМ спутаны, переплетены и стянуты в приэкваториальную область с долготами 50°–90°. АК полярных станций, расположенных в Северной Америке (ст. Певанук, Форт Смит, Инувик, Наин), протягиваются по долготе более чем на 180° и тоже приближаются к этой области. Насколько эти АК соответствуют действительности, покажет решение

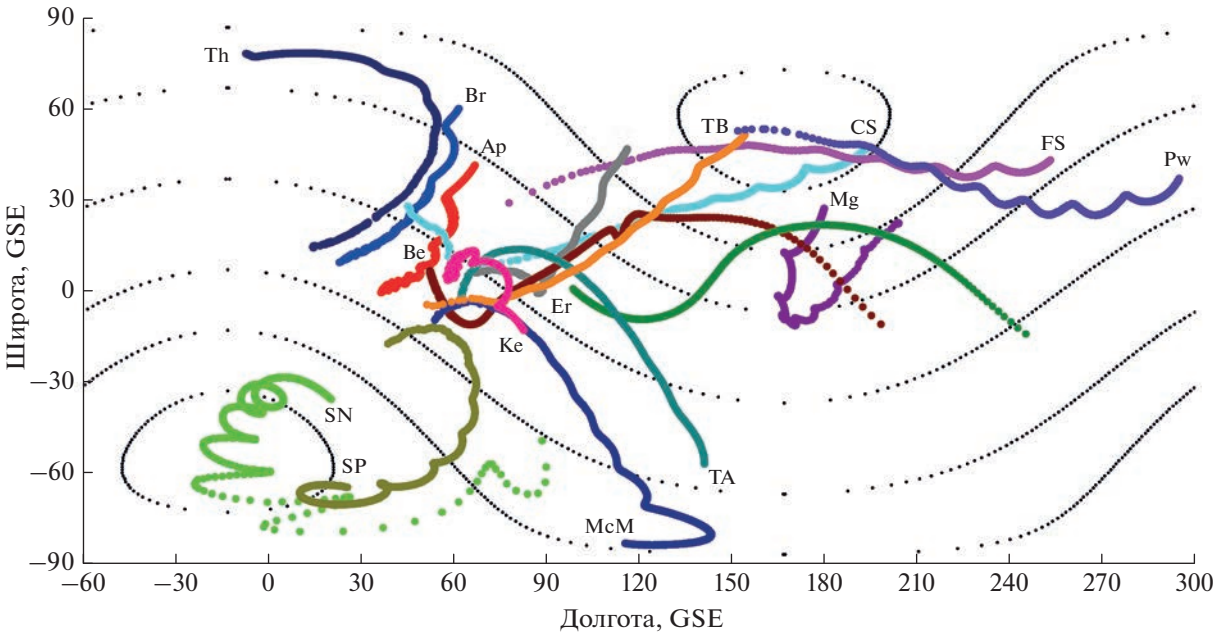


Рис. 1. Асимптотические конусы приема станций: Th – Туле, SN – Санае, SP – Южный полюс, Be – Берн, Br – Баренцбург, Ap – Апатиты, Ke – Кергелен, Er – Ереван, McM – МакМёрдо, TB – Тикси, TA – Терре Адели, Mg – Магадан, CS – мыс Шмидта, FS – Форт Смит, Pw – Певанук. Конуса вычислены для 21:30 UT. Пенумбры удалены для более ясного восприятия карты.

обратной задачи. Во время проверки методики на несложном событии GLE производилось замещение двух АК: низкоширотному НМ придавался АК полярной станции, а той – низкоширотного НМ. Все другие НМ сохраняли свои АК. В этих условиях решения обратной задачи не удавалось найти, тогда как при правильном задании АК всех станций решение было устойчивым и удовлетворительным по точности. Можно заключить: решение обратной задачи критично к соответствию вычисленных АК реальным, и, если вычисленные АК значительно расходятся с реальными, решения в таком событии не будет найдено.

Еще одной особенностью в событии GLE66 явилось существенное снижение жесткости обрезания R_c на многих НМ. В табл. 1 для примера приведены значения R_c (ГВ) для ряда НМ в недавних событиях GLE, когда магнитосфера нахо-

дилась в спокойном или слегка возмущенном состоянии, и GLE66. Строка GLE66 выделена жирным шрифтом. Определение R_c производилось по рассчитанным АК; на некоторых низкоширотных НМ уменьшение R_c доходит до атмосферного обрезания в 1 ГВ (ст. Магадан в табл. 1). Снижение значения R_c приводит к возрастанию счета НМ, что может выглядеть как регистрация СКЛ. Требуется тщательный анализ профилей и учет всех сопутствующих обстоятельств, чтобы отделить такие ложные возрастания. Для полярных НМ действует постоянное атмосферное обрезание $R_c = 1$ ГВ, их геомагнитные жесткости обрезания меньше атмосферного, и вариации R_c не имеют значения. На рис. 2 приведены профили ряда станций, позволяющие представить развитие события.

Таблица 1. Значения жесткостей обрезания R_c для ряда станций НМ во время событий GLE. Для всех GLE, кроме GLE66, использовалась модель магнитосферы Цыганенко T-03. Обозначены НМ: Atba – Алма-Ата, Athn – Афины, Bern – Берн, Bksn – Баксан (п. Нейтрино), Ervn – Ереван, Mgdn – Магадан, Ptfm – Потшефсрум

Date	GLE	Time	Atba	Athn	Bern	Bksn	Ervn	Mgdn	Ptfm
29.10.03	66	21:30	5.27	7.42	3.16	4.71	5.96	1.0	6.0
28.10.03	65	11:30	6.19	8.27	4.36	5.75	6.88	1.84	6.99
20.01.05	69	08:00	6.07	8.2	4.35	5.62	6.76	1.8	6.96
13.12.06	70	03:00	6.04	8.14	4.15	5.55	6.52	1.64	6.87
17.05.12	71	02:15	6.04	8.15	4.37	5.53	6.75	1.74	6.96
10.09.17	72	17:00	6.00	8.16	4.24	5.49	6.68	1.65	7.14

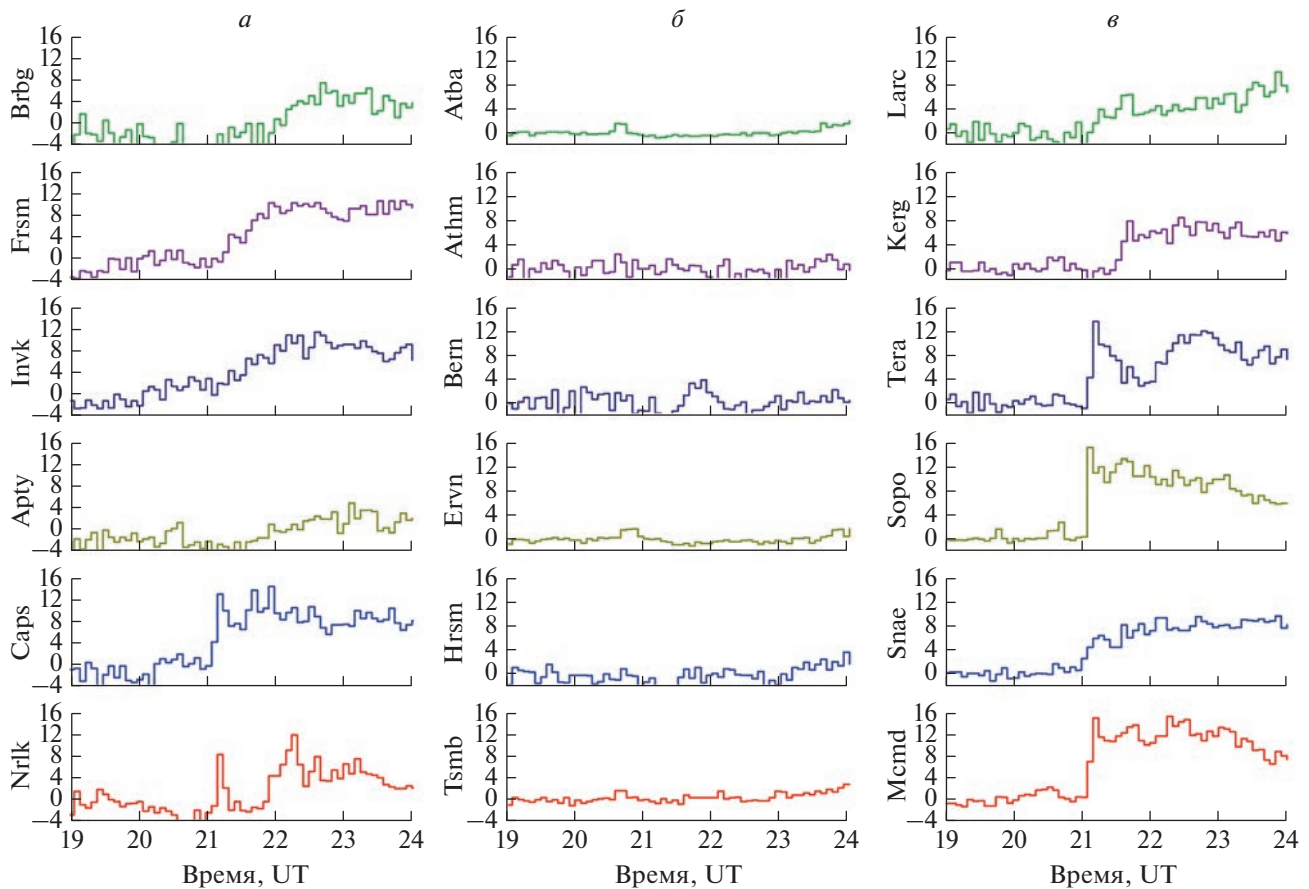


Рис. 2. Профили возрастных на некоторых станциях НМ. На панелях а) и в) приведены профили полярных НМ, на б) даны средне- и низкоширотные НМ с сохранением одного масштаба по оси ОУ на всех шкалах. Станции обозначены: Brbg – Баренцбург, Frsm – Форт Смит, Invk – Инувик, Aptv – Апатиты, Caps – мыс Шмидта, Nrlk – Норильск, Atba – Алма-Ата, Athn – Афины, Bern – Берн, Ervn – Ереван, Hrsm – Германус, Tsmb – Цумеб, Larc – Ларк, Kerg – Кергелен, Tera – Терре Адели, Sopo – Южный полюс, Snae – Санае, Mcmd – МакМёрдо. Пятиминутные данные, приведенные к барометрическому уровню 1000 мб.

При анализе профилей мы придерживались следующих оснований:

1. Правило начала. Начало радиовсплеска II типа, с большой вероятностью соответствующее началу генерации энергичных частиц [6, 16], отмечено в 20:42 UT. Свет и радиосигнал распространяются по прямой со скоростью света, тогда как протоны СКЛ движутся вдоль силовых линий магнитного поля и имеют несколько меньшую скорость (протоны 1 ГэВ преодолевают расстояние от Солнца до Земли вдоль паркеровской спирали за 11 мин), так что задержка появления СКЛ от начала радиовсплеска составит несколько минут. Примем, что, возрастания на НМ ранее 20:45 UT не могут быть произведены теми СКЛ, что вызвали GLE66.

2. Правило очередности. Наиболее энергичные частицы СКЛ приходят к Земле первыми. Они раньше покидают петлевые магнитные структуры на Солнце, меньше рассеиваются по пути и менее подвержены влиянию различных

процессов в межпланетном пространстве. Они первыми достигают Земли и вызывают крутой фронт на профилях возрастания. Крутой фронт обуславливается как раз тем, что СКЛ с энергиями в единицы ГэВ наиболее эффективны для увеличения счета НМ [17], даже небольшое увеличение их потока вызывает значимый прирост счета.

3. Правило возрастных. АК средне- и низкоширотных НМ располагаются вблизи экватора и охватывают собой не менее 180° по долготе, а с учетом пенумбры – и 360° . Означает, что, к примеру, АК станций Рим, Афины, Ереван, Алма-Ата и др. располагаются относительно близко друг к другу. Если СКЛ вызвали возрастание на НМ в Ереване, то сходный эффект отметят НМ в Афинах, Баксане, Берне, Риме и др. АК полярных и околополярных НМ намного короче, они вытягиваются обычно по широте и этому правилу не соответствуют.

Применяя перечисленные эмпирические правила, основанные на анализе десятков GLE [14],

изучим профили GLE66 (рис. 2). Ряд низко- и среднеширотных ст. НМ (ст. Цумб, Ереван, Берн, Алма-Ата и др.) имеют явно выраженный пик амплитудой ~2% длительностью 10–15 мин, начинающийся ранее 20:45 UT, в силу чего это не принимается за начало GLE66. Ст. Германус и близкая к Берну ст. Афины подобного пика не имеют. Эти же и ряд других НМ имеют плавное возрастание после 23 UT, достигающее 3–4%, которое тоже трудно отнести к GLE66. Некоторые высокоширотные НМ (ст. Форт Смит, ст. Ину-вик, ст. мыс Шмидта, ст. Певанук и др.) показывают с 20 UT растянутое на полчаса повышение счета на 3–4%, что также не может быть GLE66 в силу раннего начала.

Наиболее раннее возрастание, не противоречащее нашим правилам, отметили НМ на ст. Южный полюс, МакМёрдо в 21:05 UT (см. рис. 2), причем, несмотря на небольшую амплитуду, возрастания на них имеют крутой фронт. У НМ на ст. Терре Адели тоже крутой фронт, но амплитуда ниже. На НМ на ст. Апатиты, Баренцбург, Туле возрастания начинаются только около 21:30 UT или позже, имеют затянутый фронт. Ст. Терре Адели, Норильск и мыс Шмидта показали профили возрастания, подобные событию GLE65: двойной максимум. Первый максимум достигнут вскоре после 21 UT, второй – в 22 UT или позже. Хотя ст. Ларк по месту расположения является южнополярной, по величине значения $R_c \sim 3$ ГВ она относится скорее к среднеширотным, соответственно, отмеченная на ней амплитуда менее всех прочих южнополярных. При сопоставлении с картой АК (рис. 1) профиль счета НМ на ст. Кергелен озадачивает. АК ст. Тикси, Норильск, Южный полюс, МакМёрдо и Терре Адели вытянутые и близко сходятся, занимая своими мягкими (1 ГВ) концами ограниченную область примерно 30×30 градусов. В то же время АК ст. Кергелен в этом событии очень компактный и располагается внутри указанного квадрата, пересекаясь с четырьмя из названных НМ. Все пять НМ отметили резкое начало возрастания, а у НМ на ст. Кергелен оно запаздывает на полчаса и не имеет крутого фронта. Рядом с АК ст. МакМёрдо и Терре Адели находится АК ст. Апатиты, которые тоже показали возрастание с задержкой. В то же время АК ст. Санае, лежащий целиком вдали от указанной области пересечения многих АК, хорошо согласуется с умеренным и растянутым профилем, отмеченным на этой станции. Невозможно представить конфигурацию питч-углового распределения потока СКЛ, чтобы условия возрастания были выполнены и для указанных пяти станций НМ, и для ст. Кергелен, Апатиты. Видимо, какая-то особенность в магнитосфере имела в указанное время, которая моделью T-05 не описывается. Однако, ее роль невелика, в це-

лом АК станций соответствуют профилям возрастаний на этих станциях.

В то же время данные среднеширотных НМ – ст. Берн, Юнгфрау, Киль, Москва и других, – показавших эффект от СКЛ после 21 UT, приняты. Всего для решения обратной задачи использовано 36 НМ мировой сети, из которых десять российских.

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

Определение параметров СКЛ, приходящих на границу магнитосферы из межпланетного пространства, производится путем решения обратной задачи по данным наземной сети НМ. Находятся такие значения параметров потока СКЛ (энергетический спектр, питч-угловое распределение, направление оси анизотропии), чтобы рассчитанные по этим параметрам возрастания (отклики) на мировой сети НМ с минимальной ошибкой соответствовали реально наблюдавшимся.

Отклик (возрастание) L -го НМ в общем виде записывается [15, 18]:

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

где ΔN – возрастание на L -ой станции НМ, $I(R)$ – спектральная функция, задающая спектр СКЛ на границе магнитосферы, $F(\theta_L(R))$ – функция питч-углового распределения, определяющая относительную интенсивность потока под углом θ к оси анизотропии, $S(R)$ – удельная функция сбора, заданная в табличном виде, $A_L(R)$ – массив, содержащий список разрешенных и запрещенных жесткостей для L -го НМ, формируется при расчете АК. Суммирование ведется с тем же шагом по жесткости $dR = 0.001$ ГВ, как и расчет АК.

Спектральная функция имеет вид [18]

$$I(R) = J_0 R^{-\gamma - \Delta\gamma(R-1)}, \quad (2)$$

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

Питч-угловое распределение в общем виде записывается

$$F(\theta) = \exp\left(-\frac{\theta^2}{c}\right) \left[1 - a \exp\left(-\frac{\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)^2}{b}\right) \right], \quad (3)$$

где θ – питч-угол, c – параметр, определяющий ширину ПУР, а множитель, стоящий в квадратных скобках, формирует особенность ПУР на углах, близких к 90° . Выражение (3) опробовано на десятках GLE и показало свою пригодность из-за

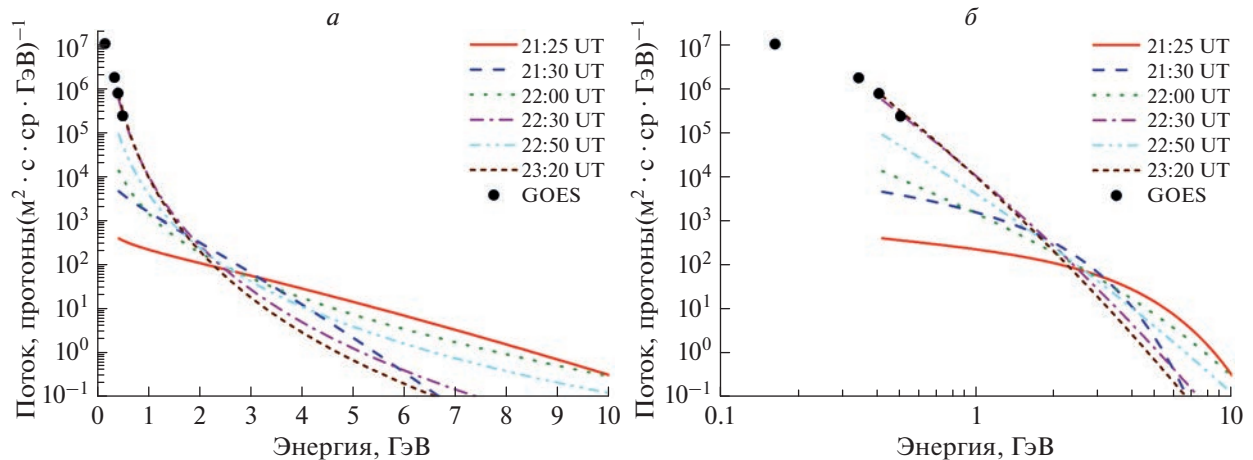


Рис. 3. Спектры СКЛ в некоторые моменты времени в полулогарифмическом (а) и в двойном логарифмическом (б) масштабах. Черные кружочки – спектр, измеренный на КА GOES-12.

универсальности при описании различных форм ПУР [14, 19].

Выражение для невязки по всему набору данных НМ запишется 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 $(\gamma, \Delta\gamma, c, a, b, \Omega, \Phi)$, и реальным возрастанием на НМ. Левая часть выражения (4) является функцией от семи параметров $(\gamma, \Delta\gamma, c, a, b, \Omega, \Phi)$. Углы Ω и Φ определяют положение оси анизотропии. Они неявно входят в (3), так как питч-угол определяется относительно некоторого направления, которое задается углами Ω и Φ в сферической системе координат.

Минимум выражения (4) будет искомым решением обратной задачи.

СПЕКТРЫ СКЛ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Решение обратной задачи проводилось для пятиминутных данных с 21:25 UT до 23:30 UT, т.е. в той части события, где наблюдается активная динамика в GLE66. Хотя возрастание началось в 21:05 UT, количество НМ, имеющих значимую амплитуду, недостаточно для получения устойчивого решения до момента 21:25 UT. Обычно поиск решения начинается с первых пятиминуток возрастания, но сходиться решение начинает только после некоторого момента, когда возрастание будет отмечено на 12–15 станциях НМ. Кроме того, как отмечалось выше, соотношение профилей возрастания на НМ и положения их

конусов на начальной стадии GLE66 очень противоречивы, и решения возможны с указанного времени 21:25 UT. На рис. 3 и 4 показаны спектры и ПУР на некоторые моменты времени, а параметры СКЛ на эти же моменты времени приведены в табл. 2. Поток J_0 указан в $(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стер} \cdot \text{ГэВ})^{-1}$, характеристическая энергия E_0 в ГэВ, Ω и Φ в градусах.

Анализ полученных параметров потока СКЛ показывает следующее. В начале GLE66, как и в подавляющем большинстве событий CLE (см. [14]), СКЛ имеют экспоненциальный спектр, соответствующий быстрой компоненте. Но уже к 22 UT спектр становится степенным, который соответствует медленной компоненте. Спектр быстрой компоненты выражается следующим образом:

$$I(E) = J_0 \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right), \quad (5)$$

Таблица 2. Параметры потока СКЛ в соответствующие моменты времени

Время UT	J_0	E_0/γ	C	a	b	Ω	Φ
21:25	$4.2 \cdot 10^2$	1.24	6.7	1	0.2	–65	3
21:30	$7.8 \cdot 10^3$	0.62	3.4	1	0.22	–62	–8
22:00	$1.8 \cdot 10^3$	3.6	35.9	0.77	0.37	–60	–12
22:30	$1.5 \cdot 10^4$	6.2	5.4	0.67	0.61	–67	34
22:50	$5.8 \cdot 10^3$	5.8	7.4	0.80	0.10	–68	54
23:20	$1.5 \cdot 10^4$	6.5	8.3	0.77	0.54	–55	–25

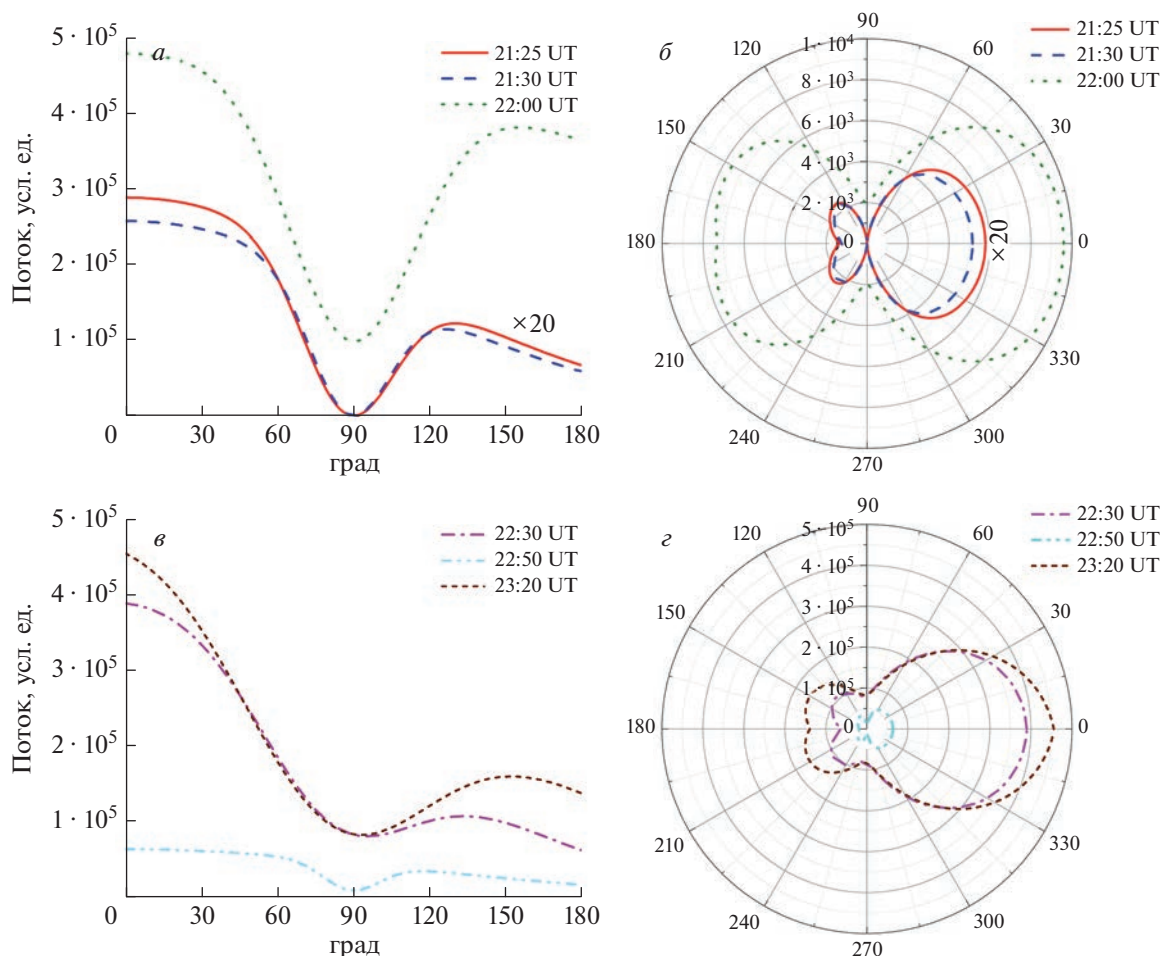


Рис. 4. Питч-угловое распределение потока СКЛ в прямоугольных (а) и полярных (б) координатах.

где E_0 — характеристическая энергия, ГэВ, J_0 — интенсивность, $(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стер} \cdot \text{ГэВ})^{-1}$. Спектр медленной компоненты имеет степенной вид:

$$I(E) = J_0 E^{-\gamma}. \quad (6)$$

Значение характеристической энергии E_0 в экспоненциальной функции на начальный момент оказалось большим. Во многих событиях GLE значение $E_0 \approx 0.5\text{--}0.6$ ГэВ, а в GLE66 в 21:25 UT $E_0 = 1.24$ ГэВ. Большее значение наблюдалось только во время GLE05 (23.02.56) и GLE42 (29.09.89). По значению E_0 GLE66 сравнимо с GLE25 (07.08.72), GLE36 (12.10.81) и GLE47 (21.05.90). Большие значения E_0 кратковременны и отмечаются в самом начале, уже в 21:30 UT E_0 приобретает типичное значение 0.62 ГэВ. Далее спектр СКЛ становился все ближе к степенному (т.е. еще имел переменный наклон, но экспоненте уже не соответствовал), и в 22:00 принял чисто степенную форму. Причем, сначала степенной спектр был жесткий, имел $\gamma = 3.6$, но быстро смягчился до $\gamma \approx 6$. Если сравнивать GLE66 с GLE65 и

GLE67, случившимися в один период активности, то у GLE66 обнаружатся некоторые черты как от GLE65, так и от GLE67. Как GLE65, GLE66 имеет небольшое число НМ, показавших раннее возрастание (ст. Норильск, Тикси, Терре Адели) и затем значительный спад к 21:30 UT, после которого начинается новый рост. Что указывает на возможность наличия узкого потока СКЛ на первой фазе события, как в GLE65 [8, 10], который смогли перехватить удачно расположенные НМ. Степенной спектр СКЛ в GLE66 после 22 UT по параметрам близок к GLE67.

Чисто качественно можно отметить, что в GLE66 ряд среднеширотных НМ (Берн, Москва, Киль и др.) показали значимое возрастание ранее 21:30 UT, что указывает на наличие в потоке СКЛ частиц выше R_c на этих станциях (3–4 ГВ) и является косвенным подтверждением большого значения E_0 .

Если проанализировать список событий GLE [14], можно отметить, что GLE25, GLE36 и GLE47 имеют близкие значения E_0 и сравнимые

интенсивности потока J_0 . В GLE47 тоже имело место ПУР с провалом около 90° . Но наиболее близко GLE66 оказалось с GLE29 (24.09.77): и по значению E_0 , и по γ . В GLE29 точно так же в самом начале события E_0 было большим, затем снизилось и спектр постепенно перешел в степенную форму с показателем $\gamma = 3.2$, затем показатель вырос до типичного значения $\gamma \sim 5$. Следует отметить, что на протяжении всего события GLE66 спектр СКЛ умягчался: сначала спектр имел большое значение характеристической энергии E_0 и был самым жестким, затем E_0 становилось меньше; переход к степенной форме также означает умягчение спектра (см. рис. 3), далее увеличение γ тоже означает смягчение. Такое поведение СКЛ типично и отмечалось во многих событиях.

На графиках со спектрами приведены данные прямых измерений на космическом аппарате (КА) GOES-12. КА GOES-12 измеряет потоки протонов в довольно широких диапазонах энергий: 80–165, 165–350 МэВ и т.д. Для получения спектра использовался метод максимумов (в англоязычной литературе — *time of maximum*, ТОМ), поскольку реально измеряемый спектр искажен запаздыванием частиц меньших энергий. ТОМ применяется для исправления этого запаздывания, но при этом становится спектром максимального за время события потока. Разработана методика пересчета этих данных в дифференциальный энергетический спектр. Наша методика основывается на методе, применяемом в [20] (и последующих каталогах этого коллектива) для подобных целей. Как видим, спектр ТОМ, полученный по данным аппарата GOES-12, неплохо стыкуется со спектром максимального потока медленной компоненты, продолжая спектр СКЛ в меньшие энергии.

Питч-угловое распределение (ПУР) потока СКЛ показывает (рис. 4), как меняется интенсивность СКЛ в различных направлениях относительно оси потока, называемой ось анизотропии. Угол между осью потока и каким-то направлением называется питч-угол, следовательно, каждому значению питч-угла в пространстве соответствует конус; питч-угол в 90° образует плоскость, перпендикулярную оси потока. Питч-угол есть также угол между линией магнитного поля и вектором скорости частицы (протона). Имеется в виду крупномасштабное межпланетное магнитное поле, поскольку ларморовский радиус протонов СКЛ составляет миллионы километров, и вариации меньшего размера на движение протонов оказывают незначительное воздействие. ПУР можно представлять в относительных единицах, принимая поток вдоль оси за 1. В этом случае графики, во-первых, часто сливаются, во-вторых, значение потока вдоль оси для всех моментов времени одинаковое и равно 1, что озадачивает

при сравнении спектров и ПУР. Нами ПУР представлено в абсолютных единицах потока, как и J_0 . Слева на рис. 4 ПУР приведено в декартовых координатах, что удобно, но не всегда наглядно. Справа ПУР представлено в полярных координатах. Ось потока — линия 0° – 180° . Вполне понятен провал ПУР на питч-углах, близких к 90 градусам: протоны с такими питч-углами слишком медленно смещаются вдоль оси, отстают от общего потока, и их, следовательно, будет мало в потоке.

Подводя итог, можно сделать следующий вывод. Событие GLE66 по параметрам потока СКЛ не является чем-то выдающимся, но попадает в малочисленную группу событий с большим значением E_0 в начальной фазе. Сложность его анализа в том, что оно произошло на фоне сильной магнитной бури и гигантского форбуш-понижения. Однако, как устойчивость полученных решений, так и близость полученных параметров спектра СКЛ к уже наблюдавшимся в других событиях GLE позволяют быть достаточно уверенными, что эти спектры соответствуют действительности и могут считаться надежными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен результат анализа события GLE66. Впервые это событие проанализировано методикой, основанной на решении обратной задачи, которая разработана в Полярном геофизическом институте (ПГИ) и проверена на десятках событий GLE. Данное GLE66 является сложным из-за сопутствовавших обстоятельств: сильная магнитная буря и глубокий форбуш-эффект, на фоне которых оно произошло. Получены значения параметров потока СКЛ в течение ряда моментов. Наблюдается типичная для событий GLE картина: спектр СКЛ на начальной фазе имеет экспоненциальную форму, а далее переходит в степенную. Полученные спектры хорошо стыкуются с измерениями СКЛ на GOES-12 в меньших энергиях. Произведено сравнение GLE66 с другими событиями. GLE66 оказалось принадлежащим группе событий с большим значением характеристической энергии на начальной фазе GLE, тогда как параметры степенного спектра на фазе максимума и спада вполне типичны.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975.
2. Bieber J.W., Clem J., Evenson P. et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. Art. No. L03S02.
3. Gopalswamy N., Barbieri L., Cliver E.W. et al. // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. Art. No. A09S00.

4. <http://pgia.ru:81/CosmicRay/AB.htm>.
5. <https://www.nmdb.eu/data>.
6. Gopalswamy N., Xie H., Yashiro S. et al. // Space Sci. Rev. 2012. V. 171. P. 23.
7. Gopalswamy N., Barbieri L., Cliver E.W. et al. // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. Art. No. A09S00.
8. Miroshnichenko L.I., Klein K.-L., Trotter G. et al. // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. Art. No. A09S08.
9. Kane R.P. // Rev. Bras. Geofis. 2009. V. 27. No. 2. P. 165.
10. Вашенюк Э.В., Мирошнichenко Л.И., Балабин Ю.В., Гвоздевский В.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. Т. 69. № 6. С. 808; Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky V.V., Miroshnichenko L.I. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2005. V. 69. No. 6. P. 905.
11. Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 5. С. 681; Kravtsova M.V., Sdobnov V.E. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 5. P. 627.
12. Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. // Геомагн. и аэрoном. 2016. Т. 56. № 2. С. 154.
13. Tsyganenko N.A., Sitnov M.I. // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. No. A3. Art. No. A03208.
14. Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B. // Astrophys. Space Sci. Trans. 2011. V. 7. No. 4. P. 459.
15. Вашенюк Э.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский В.В., Карнов С.Н. // Геомагн. и аэрoном. 2006. Т. 46. № 4. С. 1.
16. Cliver E.W., Kahler S.W., Shea M.A., Smart D.F. // Astrophys. J. 1982. V. 260. P. 362.
17. Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Miroshnichenko L.I. // Adv. Space Res. 2008. V. 41. No. 6. P. 926.
18. Cramp J.L., Duldig M.L., Flueckiger E.O. et al. // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. No. A11. Art. No. 24237.
19. Вашенюк Э.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский В.В., Шур Л.И. // Геомагн. и аэрoном. 2008. Т. 48. № 2. С. 157.
20. Базилевская Г.А., Вашенюк Э.В., Ишков В.Н. и др. Каталог энергетических спектров солнечных протонных событий 1970–1979 гг. М.: ИЗМИРАН, 1986.

Analysis of the anomalous event GLE66 on October 29, 2003

Yu. V. Balabin*

Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia

**e-mail: balabin@pgia.ru*

Event GLE66 (29.10.2003) is a selected study in a series of three GLE events that occurred in the fall of 2003. There was this most powerful magnetic storm and a deep Forbush effect, during which GLE66 occurred. The appearance of the T-05 drilling model of the magnetosphere and the availability of a methodology debugged on dozens of less complex GLE events for solving the problem of achieving results for this complex event. Obtaining the values of the parameters of the cosmic ray flux at subsequent moments of time. A pattern typical of GLE events is observed: the spectrum of observed cosmic rays at the initial phase has an exponential shape, and then ends in a power law. The obtained spectra are in good agreement with measurements of cosmic ray precipitation on spacecraft at lower energies.