

МАЛЫЕ НАЗЕМНЫЕ ВОЗРАСТАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В 24-ОМ ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2020 г. Л. И. Мирошниченко^{1,2,*}, Ч. Ли^{3,4}, В. Г. Янке¹

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН
им. Н.В. Пушкова, г. Троицк, Россия

²Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобелыцина
МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

³School of Astronomy & Space Science, Nanjing University, Nanjing, China

⁴Key Laboratory for Modern Astronomy and Astrophysics (Nanjing University), Nanjing, China
*leonty@izmiran.ru

Поступила в редакцию 25.03.2019 г.

После доработки 27.08.2019 г.

Принята к публикации 19.09.2019 г.

Представлены первые (предварительные) результаты систематического поиска малых наземных возрастных солнечных космических лучей (СКЛ) в 24-ом цикле солнечной активности. Поиск проводится по данным мировой сети нейтронных мониторов с учетом результатов прямых спутниковых измерений. Исходное предположение состоит в том, что такие возрастания указывают на возможное ускорение солнечных частиц на ударных волнах, которые генерируются выбросами коронального вещества. Решающим аргументом для проверки гипотезы может служить форма интегрального спектра ускоренных частиц по наблюдениям на нейтронных мониторах и измерениям на околоземных космических аппаратах. Изучение спектров свидетельствуют об информативности нашего подхода для лучшего понимания свойств источников СКЛ.

DOI: 10.31857/S0023420620020090

1. ВВЕДЕНИЕ

Как отмечали многие исследователи, текущий 24-ый цикл солнечной активности (СА) отличается от других циклов рядом наблюдательных особенностей (см., например, [1–3]) – в поведении солнечных пятен, частоте и мощности вспышек и т.д. В частности, протонная активность Солнца (т.е., частота солнечных протонных событий, СПС) при стандартной методике регистрации СПС у Земли, например, на космических аппаратах серии *GOES*, оказалась значительно ниже, чем в предыдущем 23-ем цикле. Так, по данным сайта NOAA (<https://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/>), с начала 24-го цикла и до сентября 2017 г. включительно было зарегистрировано всего 42 события с пороговой энергией протонов 10 МэВ при максимальной интенсивности выше 10 pfu ($1 \text{ pfu} = 1 \text{ протон} \cdot \text{см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$). Для 23-го цикла, по тем же данным, таких событий оказалось 87, т.е., примерно вдвое больше. Заметим, что события из списка NOAA характеризуют в основном нерелятивистскую область спектра солнечных космических лучей.

С другой стороны, согласно данным официального сайта <https://gle.oulu.fi>, в 23-ем цикле было

зарегистрировано 16 так называемых наземных возрастных СКЛ, которые характеризуют релятивистскую часть их спектра. В мировой литературе такие события получили название Ground Level Enhancement (GLE), и ниже для краткости мы будем пользоваться именно этим международным названием. Что касается 24-го цикла, то мировая сеть станций космических лучей (КЛ), в основном – нейтронных мониторов (НМ), наблюдала только 2 GLEs за весь цикл (<https://gle.oulu.fi>). В целом за все время наземных наблюдений СКЛ (с 28 февраля 1942 г.) было зарегистрировано 72 GLEs.

В 2014 г. [4] был предложен термин “hidden GLE” (“скрытое GLE”). Это было сделано для обозначения проблемы поиска слабых GLEs, которые могли быть зарегистрированы мировой сетью на пределе чувствительности НМ, при определенном (заданном) интервале усреднения наземных данных. Эта задача представляет очевидный интерес для явно слабого 24-го цикла. Поиск слабых GLEs важен, прежде всего, для того, чтобы получить новые сведения о предельных (минимальных и максимальных) возможностях солнечного ускорителя (ускорителей) в условиях пониженной активности Солнца. На наш взгляд, изучение

слабых GLEs может дать определенные доказательства, по крайней мере, двух интересных эффектов — ускорения солнечных частиц до релятивистских энергий на ударных волнах (УВ), инициируемых корональными выбросами массы (КВМ) и/или эффективного переноса СКЛ от залимбовых источников в межпланетном магнитном поле (ММП).

В июле 2015 г. [5] другая исследовательская группа предложила разделить наземные возрастания на три группы — собственно GLEs, так называемые sub-GLEs и даже sub-sub-GLEs. Такое деление, по мысли авторов [5], характеризует различные участки спектра СКЛ, а именно — релятивистские события с энергией частиц E_p в несколько ГэВ, события с энергией в несколько сотен МэВ и, соответственно, СПС с заметным усилением потока протонов при энергии $E_p \geq 30$ МэВ, но без протонов с энергией выше 300 МэВ. Последняя дефиниция (sub-sub-GLE) представляется нам весьма спорной, а наш термин “hidden GLE” близок к понятию “sub-GLE”, введенному авторами [5]. При современном понимании СПС, событие, например, 6.I.2014 г. [6, 7] было типичным sub-GLE. Такое разнообразие в терминологии, на наш взгляд, требует возврата к проблеме определения GLE [8, 9], с учетом высокой эффективности (точности) регистрации НМ и новых экспериментальных возможностей для наблюдений СКЛ [10] на высокогорных полярных станциях.

2. ОТБОР ДАННЫХ

Как известно, мировая сеть станций НМ чувствительна к первичным СКЛ с энергией $E_p \geq 100$ МэВ (для протонов). Если энергия первичного протона составляет $E_p < 100$ МэВ (магнитная жесткость $R < 0.44$ ГВ), то НМ практически не чувствует такие протоны из-за атмосферного поглощения вторичных нейтронов, которые образуются в атмосфере первичными протонами СКЛ. Этот эффект называют “атмосферным обрезанием” при жесткости R_a . Благодаря этому явлению все высокоширотные (полярные) НМ на уровне моря (у. м.) эффективно регистрируют вторичные нейтроны только при условии, что они были образованы первичными протонами с жесткостью $R \geq 1$ ГВ (энергия $E_p \geq 433$ МэВ). Такое свойство полярных НМ не зависит от номинальной (расчетной) жесткости — “геомагнитного обрезания” R_c . Как это удачно получилось, жесткость $R \approx 1.0$ ГВ оказалась примерно посередине между жесткостью нерелятивистских частиц, измеряемых на КА типа *GOES*, и релятивистской областью [11]. Более того, эта величина оказалась удобной референтной жесткостью обрезания для всех полярных НМ.

Согласно недавним исследованиям [12], при номинальной жесткости обрезания $R_c \approx 0.6$ ГВ ($E_p \approx 200$ МэВ), обрезание полностью определяется атмосферным поглощением вторичных нейтронов. С другой стороны, высокогорные мониторы SOPO и SOPB на Южном полюсе (американская станция Amundsen—Scott на Антарктическом плато, высота 2835 м над у. м., $R_c = 0.11$ ГВ) обладает рядом наблюдательных преимуществ [12] по сравнению с другими НМ.

В 2015 г. на южном полярном куполе Земли (Центральная Антарктика) начали работать два мини-монитора [8] (DOMC и DOMB) на французско-итальянской станции Concordia ($R_c < 0.01$ ГВ, высота 3233 м над у. м.). Благодаря этим новым инструментам, мировая сеть НМ стала более чувствительной к СКЛ, так как величина атмосферного обрезания R_a у высокогорных мониторов меньше по сравнению с НМ на уровне моря. В результате высокогорные полярные НМ могут теперь регистрировать СПС, которые могли быть “пропущены” мониторами, расположенными вблизи уровня моря. Пороговая энергия высокогорных мониторов в Антарктике, благодаря действию атмосферного обрезания, составляет около 300 вместо 433 МэВ.

Два мини-монитора Concordia [8] уже зарегистрировали ряд интересных событий, включая СПС 29.X.2015 г. (<https://gle oulu.fi>, <http://www.nmdb.eu>). Кроме ледового щита Антарктиды, существует полярный ледовый купол и в другом полушарии — ледовый щит Гренландии. Его максимальная высота (толщина льда) достигает 3205 м над у. м., но там нет станций НМ для непрерывной регистрации КЛ. Единственная станция Thule ($R_c = 0.00$ ГВ) находится на северо-западе Гренландии практически на уровне моря.

На данном этапе были подвергнуты исследованию следующие 15 СПС 24-го цикла (табл. 1). События отбирались в основном с учетом критериев GLEs и sub-GLEs, отмеченных выше. Использовались также данные некоторых нестандартных наземных детекторов, указывающих на возможный приход релятивистских частиц от Солнца в тех или иных случаях. В некоторых случаях привлекалась дополнительная информация по прогнозу GLEs. Более подробное описание таблицы приведено в [13]. Там же сделан обзор истории “малых GLEs”.

Рассмотрим особенности нашей методики отбора на примере события № 3 (27–28.I.2012 г.). Для всех исследуемых событий при анализе данных полярных НМ за базовый период выбирался один целый час непосредственно перед началом события — началом возрастания потока частиц > 10 МэВ на орбите Земли или, если есть сомнения, более ранний период, как показано на рис. 1 жирной горизонтальной линией. Возможен и дру-

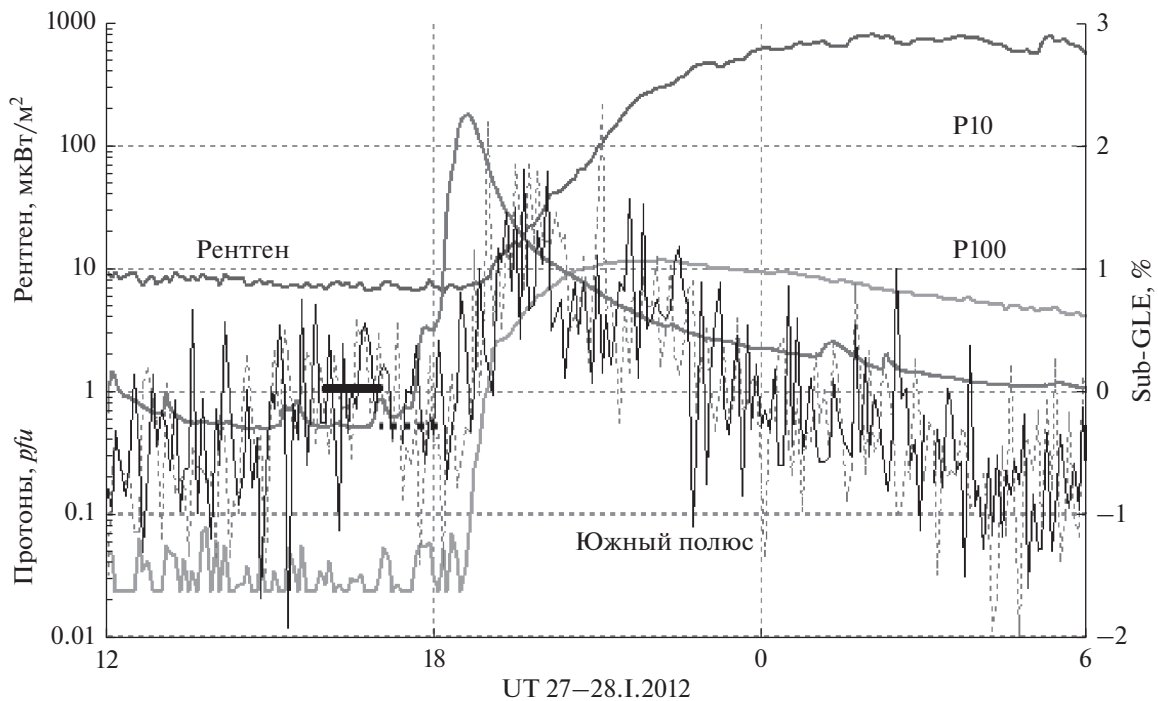


Рис. 1. Выбор базового периода для анализа солнечного протонного события 27–28.1.2012 г. (полуширная горизонтальная линия и/или точки).

гой выбор базового периода (показан на рис. 1 точками). Далее по 5-минутным значениям скорости счета НМ на полярных станциях определялись моменты ее превышения на 1%. Это и считалось наличием эффекта от релятивистских (≥ 1.0 ГВ) или субрелятивистских (≥ 0.6 ГВ) СКЛ.

Из рис. 1 видно, что в событии № 3 эффект СКЛ проявился, по крайней мере, на двух антарктических станциях – South Pole (стандартный НМ) и South Pole-B (НМ без свинца), причем амплитуда возрастания достигала 1.8% (по 5-минутным данным). Таким образом, событие

Таблица 1. Список исследуемых СПС 24-го цикла солнечной активности

№	Дата события	Интенсивность I_{\max} (>10 МэВ), pfu	Положение источника	Мощность вспышки	Скорость КВМ, км/с	Примечание
1	7.III.2011	50	N24W59	M3.7/S	NW07/2000	Hidden GLE?
2	23.I.2012	6310	N28W36	M8.7	2175	Hidden GLE?
3	27.I.2012	796	N27W71	X1.7	2508	Sub-GLE
4	7.III.2012	6530	N17E15	X5.4	1825	Hidden GLE?
5	13.III.2012	469	N18W62	M7.9	1884	Hidden GLE?
6	17.V.2012	255	N12W83	M5.1	1582	GLE071
7	22.V.2012	1660	N15W70	M5.0	1466	Hidden GLE?
8	23.VII.2012	12	Backside	Backside	Partial halo	Sub-GLE?
9	19.XI.2013	No data	S70W14	No data	No data	Hidden GLE?
10	6.I.2014	42	S18W102	Backside	Partial halo	Sub-GLE
11	6.I.2014	1033	S18W11	X1.2	Partial halo	Standard SPE
12	7.VI.2015	No data	No data	No data	No data	Unusual CR increase; Sub-GLE?
13	22.VI.2015	1070	N13W00	M2.0	Full halo	Hidden GLE?
14	29.X.2015	23	S11W90	No data	No data	Sub-GLE
15	10.IX.2017	1490	S08W83	X8.9	Full halo	GLE72

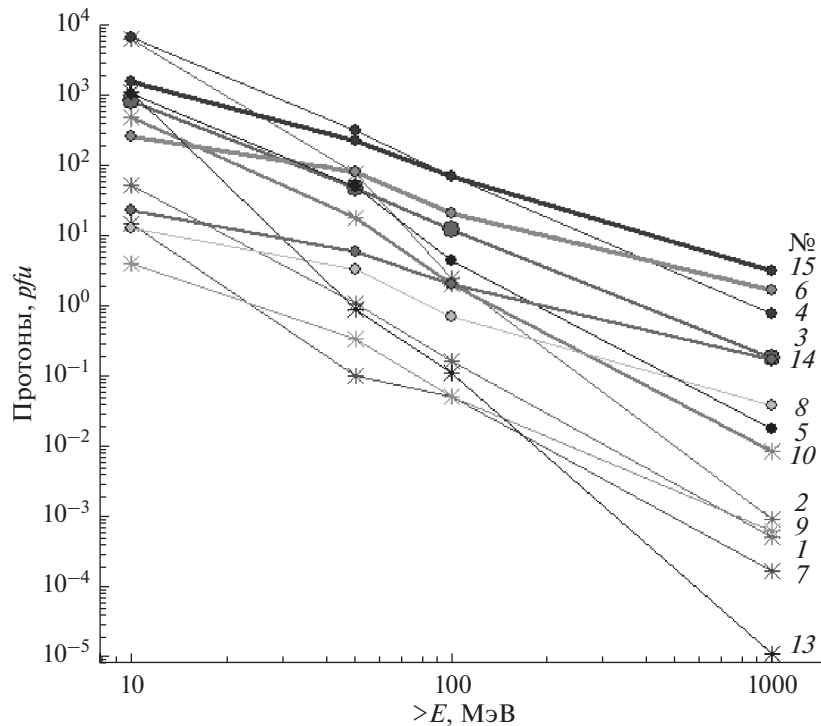


Рис. 2. Интегральные энергетические спектры в степенной форме (ТОМ-спектры), построенные для 15 событий табл. 1.

27–28.I.2012 оказалось типичным “hidden GLE” (или sub-GLE).

В нашем анализе мы столкнулись, однако, и с более сложными случаями. Например, в событии № 1 (7.III.2011 г.) только на одной станции South Pole скорость счета дважды превысила уровень 1% – около 07.30 UT и 11.00 UT. Другие полярные станции не показали никакого возрастания на фоне обычных статистических флуктуаций. С другой стороны, имеются данные нестандартной установки CARPET [14], состоящей из 240 гайгеровских счетчиков и установленной в Аргентинских Андах на высоте 2550 м над уровнем моря в пункте с координатами 31.8° S, 69.3° W и жесткостью геомагнитного обрезания $R_c = 9.65$ ГВ. В отличие от нейтронных мониторов, установка CARPET оказалась более чувствительной к низкоэнергичным вторичным компонентам КЛ, которые образуются частицами ГКЛ или СКЛ в атмосфере Земли. Согласно [14], на этой установке 7.III.2011 г. в интервале 20.10–21.40 UT наблюдались возрастания скорости счета на статистически значимом уровне от 3σ до 10σ . Это означает, что спектр солнечных частиц мог быть очень жестким.

3. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СПЕКТРЫ У ЗЕМЛИ

Другая особенность нашего подхода состоит в использовании метода интегральных спектров,

построенных по интенсивностям частиц той или иной энергии для интервала 10–1000 МэВ в момент максимума возрастания на орбите Земли (Time-of-Maximum Method, TOM-method; см., например, [9]). На рис. 2 приведены интегральные ТОМ-спектры СКЛ для 13 из выбранных нами 15 СПС. Спектры получены в основном по данным КА серии GOES (от $E_p = 10$ МэВ до энергий около 700 МэВ для протонов); далее (до энергии около 1000 МэВ) проводилась степенная экстраполяция.

Из нашего предварительного анализа следует, что наземные возрастания СКЛ можно наблюдать в полярных районах Земли только при эмпирическом условии, что поток солнечных частиц с энергией выше 100 МэВ составляет не меньше 0.2 pfu. Действительно, в событиях 1, 2, 7, 9, 13 солнечные частицы не наблюдаются. Но это лишь необходимое, но далеко не достаточное условие. Так, в событии 2, вопреки ожиданиям, наземного возрастания не наблюдалось. Как известно [9], одна из загадок формирования спектра СКЛ состоит в том, что между потоками релятивистских и нерелятивистских частиц нет устойчивой (однозначной) связи, отношение этих потоков сильно меняется от события к событию. Это свойство является одним из серьезных вызовов в физике СКЛ. Кроме того, оно сильно усложняет моделирование и расчеты радиационной опасности от СКЛ.

4. УСКОРЕНИЕ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ?

Как отмечено выше, одна из проверяемых гипотез в нашем исследовании – это возможность ускорения СКЛ до релятивистских энергий ударными волнами в короне Солнца и/или в межпланетном пространстве. Решающим аргументом pro и/или contra такой гипотезы нам представляется форма спектра ускоренных частиц. К сожалению, прямая информация о спектре СКЛ в источнике (спектр источника) нам недоступна при наблюдениях на орбите Земли. Однако косвенно есть возможность судить о спектре в источнике по данным о форме так называемого ТОМ-спектра у Земли (см. выше). Как было давно установлено, форма ТОМ-спектра отражает форму спектра в источнике, по крайней мере, для случаев, когда Земля имеет хорошую магнитную связь (через ММП) с соответствующими источниками – активными областями на Солнце.

Идея об ускорении частиц в космосе на ударных волнах (УВ) была выдвинута много лет назад (см., например, [9]) применительно к происхождению галактических космических лучей (ГКЛ). С другой стороны, еще до открытия СМЕс и генерируемых ими УВ было установлено, что некоторая доля СКЛ может быть связана с ускорением на фронтах пространственных ударных волн в межпланетном пространстве. При этом в специфических межпланетных условиях частицы могли ускоряться до релятивистских энергий. Это было обнаружено в наблюдениях таких событий, как 17.VII.1959 г., 4.VIII.1972 г., ряда других (см. [9]).

Первой теоретической попыткой объяснить спектр СКЛ на основе УВ стала работа [15]. Ее авторы рассмотрели упрощенный (линейный) вариант ускорения Ферми первого порядка с так называемым “диффузионным” ускорением на ударных волнах (или “diffusive shock acceleration” – DSA; подробнее см., например, [9]). Для представления дифференциального спектра СКЛ по энергиям авторы [15] при некоторых упрощающих предположениях получили комбинацию степенной и экспоненциальной функций:

$$dF/dE = c_0 E^{-\gamma} \exp(E/E_c) \quad (1)$$

с экспоненциальным обрезанием спектра при энергии E_c . Здесь приняты обозначения: F – поток, E – энергия частиц, E_c – энергия обрезания, γ – показатель степенного спектра, c_0 – нормировочный коэффициент. Авторы [15] считали, что выражение (1) пригодно для описания как спектров электронов, начиная со 100 кэВ, так и протонов GLE с энергией до 10 ГэВ, причем именно экспоненциальное обрезание служит признаком ускорения типа DSA на ударных волнах.

Для проверки формулы (1) авторами [15] были выбраны два характерных примера – протонные события 7 и 21.VI.1980 г. Заметим, что выбор этих

СПС для подтверждения модели ускорения на УВ оказался, на наш взгляд, не очень удачным. Оба события оказались весьма слабыми по максимальным интенсивностям протонов: они даже не попали в известный список NASA (<https://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/>), который был составлен по известному критерию NOAA. При этом энергия протонов находилась в ограниченном интервале – приблизительно 2–200 МэВ. Для дальнейшего обсуждения представляют интерес лишь пары значений γ и E_c , полученные авторами [15], а именно 2.1 и 2.3, 20 и 30 МэВ, соответственно, для событий 7 и 21.VI.1980 г.

Для обоснования используемого выражения (1) применительно к спектру частиц можно привести также работу [16], в которой за несколько лет до работы [15] была рассмотрена простая модель ускорения частиц в области взаимодействия двух коротких потоков межпланетной плазмы с учетом адиабатического замедления энергичных частиц в расширяющемся солнечном ветре. Частицы ускоряются при отражении от ударных фронтов. Модель объясняет ряд характеристик ускоренных частиц: их экспоненциальные спектры на орбите Земли, поведение спектров при изменении радиального расстояния, наблюдаемые радиальные градиенты интенсивности и наблюдаемые различия в интенсивностях и спектрах при прямом и обратном взаимодействии. Полученное решение для функции распределения f , справедливое вдоль трубки магнитного потока в солнечном ветре, можно записать в виде:

$$f \sim v^{-\frac{3}{1-\beta}} \exp\left(-\frac{v}{v_c}\right). \quad (2)$$

Здесь $\beta \equiv B/B'$ есть отношение магнитных полей перед ударным фронтом и после него; v – скорость частиц; $v_c = V(1-\beta^2)/6k_0\beta$; V – скорость солнечного ветра; k_0 – константа, нормирующая коэффициент диффузии $\kappa = k_0 v r$, r – радиальное расстояние. Вид экспоненциального выражения (2) отражает зависимость длины пробега частицы (и в итоге – коэффициента диффузии) от энергии, которая различна для частиц небольших энергий и частиц, которые обычно регистрируются на орбите Земли как солнечные протонные события.

Преобразуя формулу (1) для интегральных интенсивностей $I(>E)$, применим ее к sub-GLE 6.I.2014 г. (№ 10). На рис. 3 приведены интегральные спектры протонов по измерениям на КА GOES-13 (до 100 МэВ), а также оценки абсолютной интенсивности релятивистских частиц по данным НМ [7]. Звездочкой показана интенсивность протонов $I(>433 \text{ МэВ})$, которая была оценена методом интегральных кратностей; треугольниками обозначены оценки по методу спектрографической глобальной съемки для интегральных интенсивно-

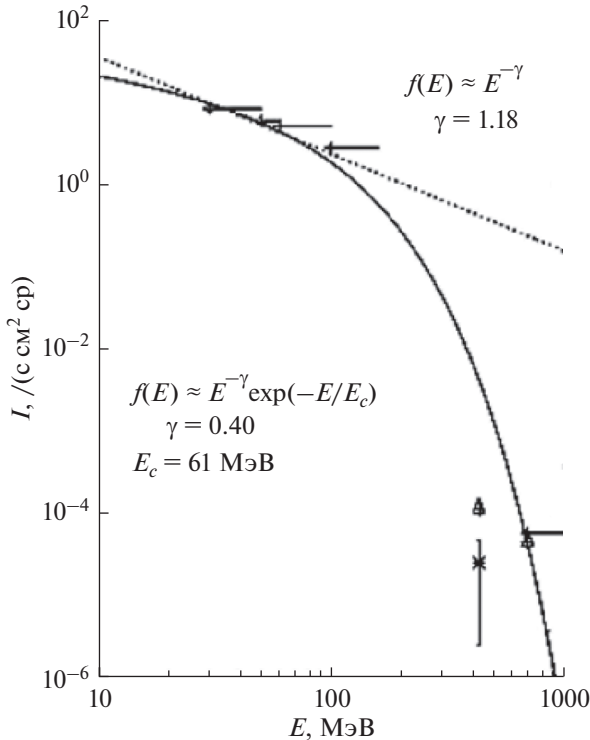


Рис. 3. Интегральные TOM-спектры, полученные по измерениям на борту КА *GOES-13* (слева сверху), и оценки [7] по наблюдениям НМ (справа внизу) для sub-GLE 6.1.2014 г.

стей протонов $I (>433 \text{ МэВ})$ и $I (>700 \text{ МэВ})$ (подробнее см. [7]). Из рис. 3 видно, что аппроксимация (1) неприменима для описания спектра во всем интервале энергий 10–1000 МэВ (даже с учетом ошибок измерений на КА *GOES-13* и разброса оценок по данным НМ). Ее нужно существенно уточнять по данным из “промежуточной” области энергий 200–300 МэВ, в частности, используя новые возможности для наблюдений КЛ на станции Concordia [8].

На рис. 4 приведены наблюдательные данные для события № 14 (29.X.2015 г.), которое авторы [8] относят к sub-GLEs. Эффект наблюдался на полярных НМ Apatity, McMurdo, South Pole, South Pole-B, Thule, Tixie Bay. На панелях показаны следующие данные: вверху слева (а) – измерения на КА *GOES-15* для протонов с энергиями $E_p \geq 10$ и ≥ 100 МэВ, а также 5-минутные данные НМ South Pole; вверху справа (б) – аналогичные данные трех антарктических НМ, включая станцию DOMC [17, 18]; внизу слева (в) – интегральные интенсивности солнечных протонов по измерениям на КА *GOES-15*; внизу справа (г) – наши аппроксимации данных *GOES-15* с помощью формулы (1) и степенной функции.

Из рис. 4 (правая панель внизу) видно, что аппроксимация TOM-спектра с помощью (1) в со-

бытии № 14 по данным КА *GOES-15* возможна, однако для окончательных выводов нужны данные об абсолютных потоках СКЛ в области энергий в несколько сотен МэВ. Согласно сайту (<https://gle.oulu.fi>), к числу sub-GLEs, кроме № 10 и 14, можно отнести также события 27.I.2012 г. (№ 3), 7.III.2012 г. (№ 4) и 7.VI.2015 г. (№ 12). Таким образом, в 24-ом цикле солнечной активности было выявлено, по меньшей мере, пять sub-GLEs.

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ

Данные таблицы, очевидно, не полны, противоречивы, а некоторые из них вызывают вопросы. Например, определенные сомнения вызывают результаты прогнозирования GLEs для событий № 12 и 14 [19]. Согласно оценкам авторов [19], событие № 12 формально попало в прогнозируемый интервал между 1.II. и 30.VI.2015 г., но фактически, насколько нам известно, в указанный период реальных GLEs не наблюдалось. Вместе с тем, в июне 2015 г. было зафиксировано три СПС с максимальными интенсивностями протонов выше 10 МэВ (в единицах *pfu*) 16, 1070 (№ 13 в нашем списке) и 22, по критерию NOAA (<https://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/>), соответственно, 18, 22 и 27 июня. Событие № 13, по нашему мнению, может принадлежать к числу “hidden” GLEs.

Что касается события № 14, то в [19] был указан прогнозируемый интервал 11.VIII.–2.XII.2015 г. С другой стороны, недавно авторы [18] объявили, что два НМ (South Pole и DOMC) зарегистрировали 29.X.2015 г. увеличение скорости счета, вызванное приходом СКЛ (см. рис. 4, правая верхняя панель). При этом, однако, максимальная интенсивность протонов с энергией выше 10 МэВ составила, по критерию NOAA, всего 23 *pfu*.

Несмотря на существующие неопределенности, мы считаем, что приведенная выше информация будет полезной для дальнейшего тщательного изучения слабых GLEs (или “hidden” GLEs, или sub-GLEs). Это особенно справедливо, если принять во внимание теоретическую возможность, что некоторая доля СКЛ может быть ускорена до релятивистских энергий на ударных волнах, которые генерируются выбросами коронального вещества. Такая возможность допускалась, в частности, при анализе GLE71 (17.V.2012 г.) [20]. Такое же предположение использовалось для интерпретации свойств sub-GLE, наблюдавшегося 6.I.2014 г. [6, 7]. Событие № 15 (GLE72, 10.IX.2017 г.) заслуживает специального внимания: оно случилось на нисходящей фазе 24-го цикла (вблизи его минимума). С точки зрения космической погоды весь возмущенный период 4–10.IX.2017 г. представляет определенный интерес.

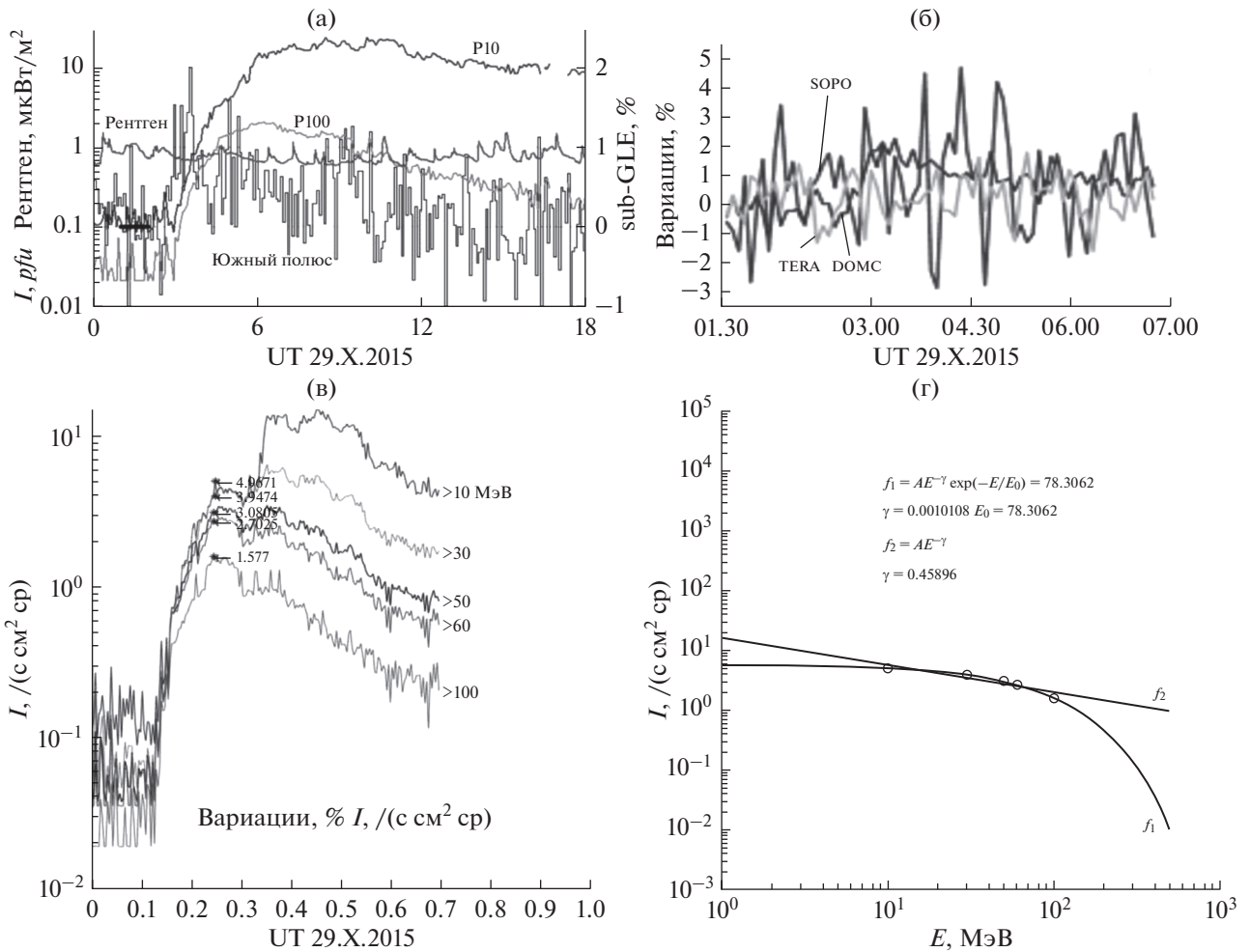


Рис. 4. Временные профили интегральной скорости счета на NM South Pole (а); данные трех антарктических станций, включая NM DOMC [18] (б); интегральные интенсивности солнечных протонов по измерениям на КА GOES-15 (в); наши аппроксимации данных GOES-15 (г) с помощью формулы (1) и степенной функции.

Совершенно неожиданный аспект обсуждаемой проблемы был выявлен недавно [21] при анализе эффектов СКЛ в антисовпадетельной защите ACS (сцинтилляционный детектор BGO весом 512 кг), который экранировал спектрометр SPI на борту орбитальной астрофизической обсерватории INTEGRAL. Как известно, временем прихода протонов релятивистской энергии традиционно считают начало наземного возрастания (GLE), зарегистрированное одним или несколькими НМ мировой сети. Неточность и неоднозначность определения момента прихода солнечных протонов по данным НМ обусловлена как собственным фоном детектора (статистической точностью регистрации), так и вариациями порога жесткости геомагнитного обрезания и направления конуса приема проходящих частиц.

Авторы [21] обратили внимание на то, что в некоторых случаях GLEs увеличения скорости счета в детекторе ACS наблюдались явно раньше, чем

на наземных НМ. Были обнаружены два случая, в которых детектор ACS SPI оказался более эффективным инструментом для наблюдения начала СПС – GLE на орбите Земли, чем сеть НМ: 17.I.2005 г. (GLE68) и 13.XII.2006 г. (GLE70). По амплитуде возрастания эти события были довольно слабыми, при этом задержка прихода релятивистских протонов к Земле относительно всплеска жесткого рентгеновского излучения считалась значимой, что свидетельствовало о более позднем ускорении протонов. Между тем, возрастание темпа счета ACS SPI, вызванное приходом релятивистских протонов, наблюдалось раньше и соответствовало ускорению СКЛ в момент вспышки. Этот факт подчеркивает необходимость создания детекторов солнечных протонов и электронов космического базирования с низким уровнем собственного фона. Такие детекторы необходимы для измерения потоков СКЛ малой интенсивности (проблема “hidden GLEs”). Действительно, в отличие от двух

отмеченных выше слабых GLEs [21], в двух других (экстремально мощных) событиях, 28.X.2003 г. (GLE65) и 20.I.2005 г. (GLE69), приход солнечных протонов на ACS SPI наблюдался одновременно с началом анизотропного возрастания на сети НМ, т.е. совпал с приходом быстрой компоненты СКЛ (подробнее об этом см. [9] и цитируемую там литературу).

Таким образом, наши предварительные результаты пока не дают однозначного ответа на вопрос о возможной природе источника (источников) малых наземных возрастаний СКЛ. Более обстоятельный углубленный анализ 15 событий из нашего списка будет предметом отдельной статьи.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты 17-29-01022, 17-02-00508), исследовательскими программами Президиума Российской академии наук № 3 и 12). Работа основана на экспериментальных данных Уникальной Научной Установки под названием “Российская Национальная Сеть Станций Космических Лучей”. Ч. Ли был поддержан NSFC Китая (гранты № 11673012 и 11533005). Авторы также выражают огромную благодарность всем исследовательским группам и многим отдельным исследователям, чьи данные были использованы в нашей статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kozlov V.I., Kozlov V.V.* Cosmic ray fluctuation parameter as indicator of 11-year cycle activity growth phase // *J. Phys. Conf. Ser.* 2013. V. 409. P. 012160. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012160>
2. *Kozlov V.I., Kozlov V.V.* Arrhythmia of the Sun. *Cosmic Rays* / Ed. Krymsky G.F. Yakutsk: Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy, 2016.
3. *Vainio R., Raukunen O., Tylka A.J. et al.* Why is solar cycle 24 an inefficient producer of high-energy particle events? // *Astron. Astrophys.* 2017. V. 604. A47. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/20173054>
4. *Li C., Miroshnichenko L.I., Fang C.* Proton activity of the Sun in current solar cycle 24 // *Research in Astronomy and Astrophysics.* 2015. V. 15. P. 1036-1044. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/15/7/011>
5. *Atwell W., Tylka A.J., Dietrich W. et al.* Sub-GLE solar particle events and the implications for lightly-shielded systems flown during an era of low solar activity // 45th International Conference on Environmental Systems. 12–16 July 2015. Bellevue, WA. ICES-2015-340, 2015.
6. *Thakur N., Gopalswamy N., Xie H. et al.* Ground Level Enhancement in the 2014 January 6 solar energetic particle event // *Astrophys. J. Lett.* 2014. V. 790. P. L13–L16. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/790/1/L13>
7. *Li C., Miroshnichenko L.I., Sdobnov V.E.* Small size GLE of 6 January 2014: Acceleration by CME-driven shock? // *Solar Phys.* 2016. V. 291. P. 975–987. <https://doi.org/10.1007/s11207-016-0871-8>
8. *Poluianov S.V., Usoskin I.G., Mishev A.L. et al.* GLE and sub-GLE redefinition in the light of high-altitude polar neutron monitors // *Solar Phys.* 2017. V. 292. P. 176. <https://doi.org/10.1007/s11207-017-1202-4>
9. *Мирошниченко Л.И.* Солнечные космические лучи: 75 лет исследований // *Успехи физических наук.* 2018. Т. 188. № 4. С. 345–376.
10. *Poluianov S., Usoskin I., Mishev A. et al.* Mini Neutron Monitors at Concordia Research Station, Central Antarctica // *Research Paper J. Astron. Space Sci.* 2015. V. 32. № 4. P. 281–287. <https://doi.org/10.5140/JASS.2015.32.4.281>
11. *Smart D.F., Shea M.A.* The longitudinal distribution of solar flares associated with solar proton events at the Earth // *Adv. Space Res.* 1996. V. 17. P. 113–116.
12. *Evenson P., Bieber J., Clem J., Pyle R.* South Pole neutron monitor lives again // *Proc. 32nd Int. Cosmic Ray Conf., Beijing, China.* 2011. V. 11. P. 454–457.
13. *Miroshnichenko L.I.* Retrospective analysis of GLEs and estimates of radiation risks // *J. Space Weather & Space Climate.* 2018. V. 8. № A52. P. 1–35. <https://doi.org/10.1051/swsc/2018042>
14. *Makhmutov V., Raulin J.-P., De Mendonca R.R.S. et al.* Analysis of cosmic ray variations observed by the CARPET in association with solar flares in 2011–2012 // *IOP Conf. Ser.* 2013. V. 409. P. 012185. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012185>
15. *Ellison D.C., Ramaty R.* Shock acceleration of electrons and ions in solar flares // *Astrophys. J.* 1985. V. 298. P. 400–408.
16. *Fisk L.A., Lee M.A.* Shock acceleration of energetic particles in corotating interaction regions in the solar wind // *Astrophys. J.* 1980. V. 237. P. 620–626.
17. *Mishev A., Usoskin I., Kocharov L.* Using global neutron monitor network data for GLE analysis: Recent results // *Proc. ICRC2017_147, Bexco, Busan, Korea, 2017.*
18. *Mishev A., Poluianov S., Usoskin I.* Assessment of spectral and angular characteristics of sub-GLE events using the global neutron monitor network // *J. Space Weather Space Clim.* 2017. V. 7. A28. <https://doi.org/10.1051/swsc/2017026>
19. *Pérez-Peraza J., Juárez-Zuñiga A.* Prognosis of GLEs of relativistic solar protons // *Astrophys. J.* 2015. V. 803. P. 27. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/803/1/27>
20. *Li C., Firoz K.A., Sun L.P., Miroshnichenko L.I.* Electron and proton acceleration during the first GLE event of solar cycle 24 // *Astrophys. J.* 2013. V. 770. P. 34. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/770/1/34>
21. *Струминский А.Б., Зимовец И.В.* К оценке времени прихода первых релятивистских солнечных протонов на Землю // *Изв. РАН, сер. физ.* 2009. Т. 73. № 3. С. 332–335.