

**УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**

**ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ**

**Солнечные космические лучи: 75 лет исследований**

Л.И. Мирошниченко

28 февраля 2017 г. исполнилось 75 лет с момента первой уверенной регистрации солнечных космических лучей (СКЛ), т.е. ускоренных солнечных частиц с энергией от  $10^6$  эВ до  $\sim 10^{10} - 10^{11}$  эВ. Суммированы основные данные и обобщены результаты, накопленные за весь период наблюдений и теоретических исследований СКЛ. Кратко описаны история открытия, методы и аппаратура для регистрации СКЛ. Более подробно обсуждаются некоторые физические, методические и прикладные аспекты, связанные с генерацией СКЛ. Особое внимание уделено механизмам ускорения заряженных частиц на Солнце или вблизи него. Приведены современные представления о процессах взаимодействия СКЛ с атмосферой Солнца, особенностях их переноса в межпланетном магнитном поле, о движении в магнитосфере Земли и воздействии на земную атмосферу. Показано, что в этой области космофизики получены фундаментальные результаты, представляющие большой интерес для астрофизики, солнечно-земной физики, геофизики и практической космонавтики.

**Ключевые слова:** Солнце, солнечные вспышки, ускорение частиц, солнечные космические лучи

PACS numbers: 61.05.fg, 61.46.-w, 75.50.Mm

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.03.038091>

**Содержание**

1. Введение (346).
2. Солнце как источник космических лучей (346).
  - 2.1. Краткая история открытия и методы регистрации.
  - 2.2. Современные базы данных.
  - 2.3. Две парадигмы солнечно-земных связей.
  - 2.4. Гелиодолготные эффекты в нерелятивистской области.
  - 2.5. Гелиодолгота источников GLEs.
  - 2.6. Классификация событий.
3. Механизмы ускорения, спектр и состав частиц (352).
  - 3.1. Стержневые проблемы физики СКЛ.
  - 3.2. Форма спектра.
  - 3.3. Максимальная энергия СКЛ.
  - 3.4. Предельный спектр СКЛ.
  - 3.5. Данные нестандартных детекторов.
4. Новая концепция GLE (355).
  - 4.1. Источник GLE: вспышка и/или СМЕ?
  - 4.2. Две релятивистские компоненты GLE.
  - 4.3. Природа источников быстрой и медленной компонент.
  - 4.4. Ускорение ударными волнами.
  - 4.5. Роль межпланетного переноса.
  - 4.6. Проблема первых частиц GLE.
  - 4.7. GLE и состав ускоренных частиц.
  - 4.8. Состав СКЛ и свойства источников.
  - 4.9. Гамма-излучение вспышек.
  - 4.10. Солнечные нейтроны.
5. Долговременные вариации (364).

**Л.И. Мирошниченко.** Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Калужское шоссе 4, 108840 Троицк, Москва, Российская Федерация; Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скobelьцына, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1, 119991 Москва, Российская Федерация  
E-mail: leonty@izmiran.ru

Статья поступила 29 декабря 2016 г.,  
после доработки 28 февраля 2017 г.

- 5.1. Годовые вариации числа СПС.
  - 5.2. Распределение событий СКЛ во времени.
  - 5.3. Частота регистрации GLEs.
6. Функции распределения событий (366).
    - 6.1. Распределение GLEs.
    - 6.2. Вспышки на звёздах, подобных Солнцу.
  7. Экстремальные ("древние") события СКЛ (367).
    - 7.1. Концепция экстремального события СКЛ.
    - 7.2. Наибольшие события СКЛ в прошлом.
    - 7.3. Новая функция распределения.
  8. Геофизические и прикладные аспекты (369).
    - 8.1. Атмосферные эффекты СКЛ во время GLE.
    - 8.2. Генерация космогенных изотопов.
    - 8.3. СКЛ в прогностических схемах.
  9. Подводя итоги... (372).
    - 9.1. Возникающие вопросы и/или нерешённые проблемы.
    - 9.2. Перспективы изучения СКЛ.

**Список литературы (374).**

**Основные сокращения**

- БК — быстрая компонента СКЛ  
БПСТ — большой подземный сцинтиляционный телескоп  
ГКЛ — галактические космические лучи  
ГМП — глобальное магнитное поле (Солнца)  
ИК — ионизационная камера  
КА — космический аппарат  
КВМ — корональный выброс массы (СМЕ)  
КЛ — космические лучи  
МГГ — международный геофизический год (1957–1958)  
МК — медленная (задержанная) компонента СКЛ  
ММП — межпланетное магнитное поле  
МТ — мюонный телескоп  
НМ — нейтронный монитор  
СА — солнечная активность  
СК — событие Кэррингтона  
СКЛ — солнечные космические лучи

СНТ — солнечный нейтронный телескоп  
 СПС — солнечное протонное событие  
 ТС — токовый слой  
 ACE — Advanced Composition Explorer (spacecraft)  
 ACS — Anti-Coincidence Shield for spacecraft Integral  
 BDE — Bastille day event (proton event of 14 July 2000)  
 CI — coronal index  
 CME — coronal mass ejection  
 FD SOC — Fractal-diffusive self-organized criticality (model)  
 GLE — ground level enhancement (proton event)  
 GOES — geostationary operational environmental satellites (geostationary satellites)  
 NMDB — Neutron Monitor Data Base  
 NOAA — National Oceanic and Atmospheric Administration  
 SEC — Space Environment Center  
 PFSS — Potential Field on Source Surface (model)  
 pfu — proton flux unit ( $1,0 \text{ pfu} = 1 \text{ протон}/(\text{см}^2 \text{ с cp})$ )  
 SEP — solar energetic particle  
 SFI — solar flare index  
 UT — Universal Time

## 1. Введение

Заряженные солнечные частицы, ускоренные до энергий от  $\sim 10^6$  до  $\sim 10^{10} - 10^{11}$  эВ, с исторически возникшим и давно устоявшимся названием "солнечные космические лучи" (СКЛ) изучаются различными методами уже 75 лет. Впервые они были зарегистрированы в феврале 1942 г. [1], т.е. спустя почти 30 лет после открытия галактических космических лучей (ГКЛ). Но уже лет через 15 изучение СКЛ становится отдельной плодотворной ветвью космофизики. Несколько забегая вперёд, отметим, что благодаря исследованиям СКЛ были открыты по меньшей мере два фундаментальных процесса в космосе. Первый из них — это ускорение частиц до релятивистских энергий в атмосфере Солнца, т.е. генерация СКЛ, которым посвящён настоящий обзор. Второй процесс — это генерация ударных волн в межпланетной плазме; этот процесс проявляется в виде понижения интенсивности ГКЛ (так называемого эффекта Форбуша), причём оба процесса обусловлены энергичными солнечными явлениями [2].

Вторгаясь в атмосферу Земли, первичные космические лучи (КЛ) разрушают ядра азота и кислорода (наиболее распространённых элементов в атмосфере) и порождают ядерно-каскадный процесс, в котором рождаются многочисленные вторичные частицы — вторичные КЛ. Приход СКЛ к Земле вызывает резкое возрастание потока вторичных КЛ при наблюдениях на поверхности Земли. Наземные возрастания получили специальное название GLE (ground level enhancement).

Первые события СКЛ регистрировались обычно в виде статистически значимых возрастаний потока вторичных КЛ над фоном ГКЛ. Сначала такие эпизодические явления изучались в рамках более общей проблемы вариаций КЛ в целом (см., например, [3–5]). В дальнейшем появились обстоятельные обзоры [6, 7] и первые монографии [8, 9]. К настоящему времени литература по проблеме СКЛ исчисляется сотнями оригинальных и обзорных статей; укажем лишь те, которые наиболее часто цитируются в последние годы [10–16]. Добавим к

этому, что различные методические, экспериментальные и общефизические аспекты изучения СКЛ, особенности их взаимодействия с атмосферой Солнца, геофизические эффекты СКЛ, их возможный вклад в проблему солнечно-земных связей, а также некоторые прикладные аспекты в их современном понимании были описаны недавно в монографиях [17–20]. Важный вклад в изучение СКЛ внесли, в частности, учёные ИЗМИРАНа, который недавно отметил своё 75-летие [21].

В настоящем обзоре после необходимого исторического введения мы попытаемся изложить новейшие теоретические (модельные) и наблюдательные результаты, которые представляются автору наиболее значимыми с точки зрения дальнейших исследований и возможных практических приложений. При этом автор отдаёт себе отчёт в том, что ему не удастся сколько-нибудь полно отразить текущее положение в этой быстро развивающейся области космофизики. Этот недостаток мы по возможности (частично) компенсируем подбором иллюстраций и ссылок на оригинальные работы.

## 2. Солнце как источник космических лучей

### 2.1. Краткая история открытия и методы регистрации

В истории науки не так уж часто бывают случаи, когда рождению нового направления можно сопоставить конкретную дату. Но именно такой случай имел место для СКЛ: 28 февраля 1942 г. наземными детекторами был впервые зарегистрирован приход к Земле ускоренных (релятивистских) протонов от Солнца. Спустя неделю, 7 марта 1942 г. было зарегистрировано новое аналогичное событие [1]. Так состоялось одно из крупнейших астрофизических открытий XX века: оказалось, что в атмосферах звёзд заряженные частицы могут ускоряться до высоких (релятивистских) энергий. Правда, осознание этого фундаментального факта и его тесной связи с солнечными вспышками пришло не сразу. Авторы [1] связывали вариации КЛ 28 февраля и 7 марта 1942 г. с возмущениями магнитосферы Земли. Лишь после регистрации третьего подобного события 25 июля 1946 г. автор открытия [22] осторожно написал, что эти наблюдения "...позволяют сделать довольно неожиданный вывод, что все три необычных возрастания интенсивности КЛ можно объяснить потоками заряженных частиц, испущенных Солнцем". После четвёртого наземного возрастаия 19 ноября 1949 г. [23–25] связь наблюдавшихся релятивистских частиц со вспышками на Солнце стала неоспоримым фактом, положившим начало новой важнейшей научной концепции.

На рубеже 1990-х годов за наземными возрастаниями СКЛ прочно закрепилось международное название GLE (ground level enhancement или ground level event) [2, 26]. Для удобства исследователей все подобные события получили порядковые номера начиная с GLE01 28 февраля 1942 г. За 75 лет наземных наблюдений (с февраля 1942 г. по февраль 2017 г.) было уверенно зарегистрировано 71 GLEs. События GLE интенсивно исследуются во многих странах. Так, в 2012 г. в специальном выпуске журнала *Space Science Reviews* (vol. 171) была опубликована подборка из семи статей зарубежных авторов по различным аспектам исследования GLEs. Такой интерес к проблеме, несомненно, отражает её фундаментальный характер.

В том же 1942 г. (26–28 февраля) британские радиоинженеры, занимавшиеся проблемой слежения за немецкими подводными лодками, впервые наблюдали на экранах радаров интенсивные радиошумы (радиовсплеск) в диапазоне метровых волн (4–6 м) из направления на Солнце [27]. Как выяснилось позже, это излучение, обусловленное ускоренными электронами, было связано с прохождением через центральный меридиан Солнца (ЦМС) активной области. По-видимому, именно в ней 28 февраля 1942 г. произошла мощная вспышка балла 3+ с координатами 07°N, 04°E [10, 11]. Таким образом, в феврале 1942 г., кроме открытия СКЛ, произошло другое историческое событие в изучении Солнца: родилась солнечная радиоастрономия, о чём стало известно только в 1946 г. [28].

Кроме вспышек и радиовсплесков, имеются и другие виды активности Солнца: факелы и пятна, протуберанцы, выбросы корональной массы, корональные дыры и т.д. В целом солнечная активность (СА) представляет собой комплекс явлений и процессов, связанных с образованием и распадом в солнечной атмосфере сильных магнитных полей, с превращением их энергии в энергию движения вещества, в энергию ускоренных частиц и различных видов электромагнитного излучения.

В 1940-х годах наблюдения и данные о земных проявлениях СА, т.е. о геомагнитных бурях, полярных сияниях, ионосферных возмущениях и т.п. (например, в виде помех для радиотехнических средств обнаружения и слежения), были скрыты плотной завесой секретности [29] между противоборствующими сторонами во второй мировой войне (1939–1945 гг.). Более того, изучение КЛ в те годы относились исключительно к ядерной физике, а получаемые результаты были также частично (США) или полностью (Германия, СССР) засекречены в связи с разработкой ядерного оружия [30, 31]. Отметим, что между 1941 и 1943 годами различными группами в Европе и Америке наблюдались и другие возрастания интенсивности КЛ, напоминавшие эффекты от солнечных вспышек [27]. Но лишь после наземных событий 1946 и 1949 годов гипотеза о солнечном происхождении подобных эффектов была признана научной истиной.

Это стало первым существенным результатом в данной области. Было открыто фундаментальное астрофизическое явление — ускорение заряженных частиц (протонов) в космических условиях (в атмосферах звёзд). Заметим, что это произошло ещё до того, как в 1953 г. в Крабовидной туманности было обнаружено магнитотормозное (синхротронное) радиоизлучение, которое свидетельствовало об аналогичных процессах ускорения электронов в Галактике (например, при вспышках сверхновых звёзд). Важно подчеркнуть, что изучение СКЛ началось именно с анализа данных наземных наблюдений. Это случилось спустя почти 30 лет после исторического открытия В. Гессом галактических космических лучей в августе 1912 г. (см., например, оригинальную работу [32], а также исторические очерки [33, 34]), причём фактически их природа вплоть до 1940-х годов оставалась неясной.

## 2.2. Современные базы данных

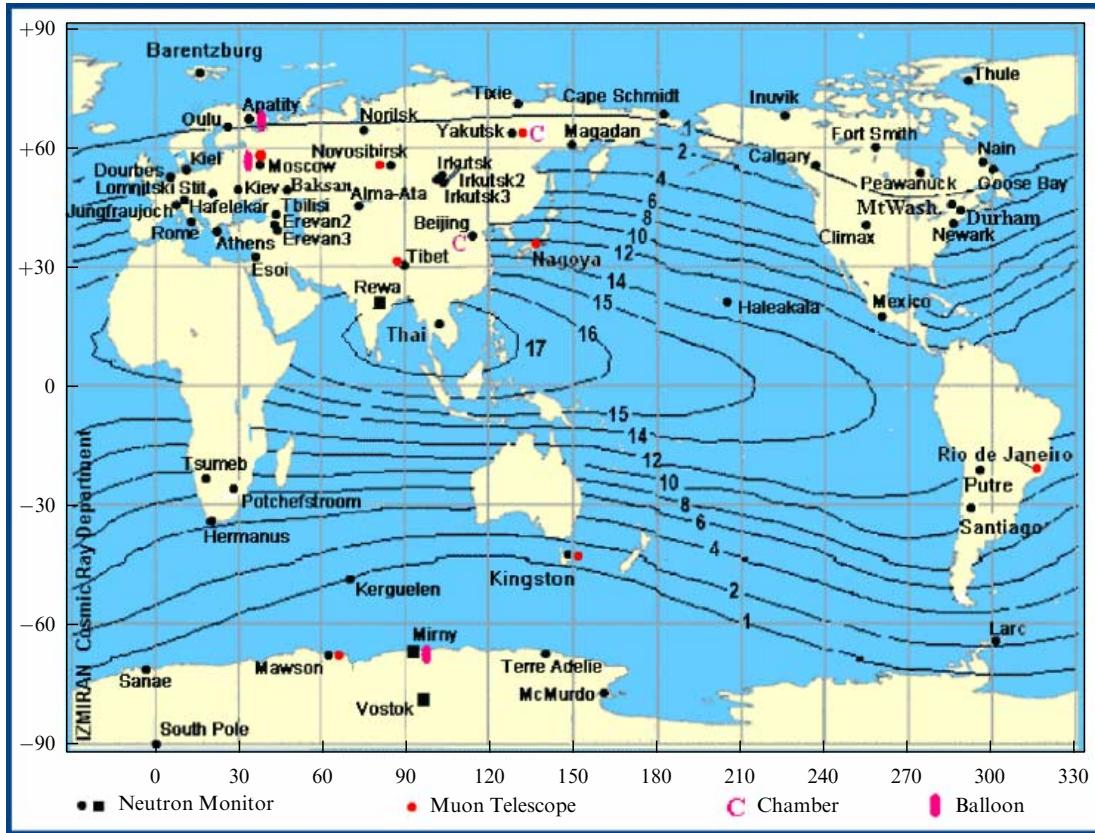
Наземные наблюдения вторичных компонент (в основном мюонов и нейтронов) до сих пор остаются самым надёжным источником данных о первичных релятивистских СКЛ. Исторически первыми детекторами для реги-

страции GLE были ионизационные камеры (ИК) и мюонные телескопы (МТ), а с середины 1950-х годов — нейтронные мониторы (НМ). При регистрации СКЛ эти стандартные детекторы на уровне моря имеют эффективные энергии соответственно ~25–35, 15–20 и 4–6 ГэВ [17]. Нейтронные детекторы для регистрации GLE были впервые использованы во время события 19 ноября 1949 г. [23]. Более 50 лет назад была создана мировая сеть станций НМ [4, 5]. Одной из важных характеристик станции КЛ является предельная магнитная жёсткость (предельная энергия) частиц, которые могут приходить на границу атмосферы над данной точкой земной поверхности (так называемая жёсткость геомагнитного обрезания частиц  $R_c$  при их движении в магнитосфере Земли). Магнитная жёсткость частиц  $R = cp/Ze$  представляет собой единицу импульса  $p$  на единицу заряда  $Z$  ( $c$  — скорость света,  $e$  — заряд электрона); жёсткость обычно измеряется в единицах вольт, мегавольт и гигавольт. Связь между магнитной жёсткостью и энергией частицы описана в разделе 3.1.

Системы сбора и анализа данных, получаемых на нейтронном мониторе, со временем постоянно совершенствовались, и в начале 1960-х годов была создана новая его модификация — нейтронный супермонитор СНМ-64 [35]. Статистическая точность такого прибора за один час регистрации, например, на широте Апатитов (67,57°N, 33,4°E, 181 м над уровнем моря,  $R_c = 0,65$  ГВ) составляет 0,246 % в минимуме солнечной активности, когда интенсивность ГКЛ максимальна. Для станции Апатиты это примерно втрое выше, чем точность регистрации НМ типа МГГ (0,81 %). Для станции Москва (Троицк, 55,47°N, 37,32°E, 200 м над уровнем моря,  $R_c = 2,44$  ГВ) эта величина составляет ~0,18 %, а на широте Мехико (2274 м над уровнем моря, 99,2°W, 19,33°N,  $R_c = 8,2$  ГВ) она близка к 0,36 %. Точность регистрации зависит от высоты станции над уровнем моря, её широты (точнее, от  $R_c$ ), а также от числа счётчиков СНМ-64 в данном детекторе (это число не всегда стандартно). Высокая точность позволяет измерять "тонкую структуру" временных профилей потоков СКЛ во время GLE (с разрешением до 1 мин и даже до 10 с), а затем строить более точные модели их ускорения, испускания и распространения.

В настоящее время мировая сеть для непрерывной регистрации КЛ насчитывает около 50 станций, оборудованных в основном супермониторами СНМ-64 (рис. 1); их данные образуют единую международную базу Neutron Monitor Data Base (NMDB, <http://www.nmdb.eu>; см. также международную базу данных по событиям GLE <http://gle.oulu.fi>). Существуют наземные МТ различной конструкции, которые позволяют регистрировать СКЛ, приходящие под большими углами к вертикали. Имеются также несколько подземных МТ, полезных для регистрации экстремальных событий GLE типа 29 сентября 1989 г. (GLE42) (см., например, [36–38]). Нередко GLE дают всплески интенсивности вторичных мюонов на нестандартных установках, созданных для решения астрофизических задач и/или изучения ядерно-физическиских эффектов ГКЛ [39]. Эти наблюдения удачно дополняются сетью солнечных нейтронных телескопов (СНТ) [40], которые регистрируют приход вторичных нейтронов, рожденных в атмосфере Солнца первичными ускоренными ионами.

Данные мировой сети станций позволяют оценивать максимальную энергию СКЛ  $E_m$  (или максимальную



**Рис. 1.** (В цвете онлайн.) Мировая сеть станций для непрерывной регистрации космических лучей галактического и солнечного происхождения (ГКЛ и СКЛ). Числа у кривых соответствуют изолиниям для жёсткости геомагнитного обрезания первичных космических частиц (в единицах ГВ) (рисунок адаптирован с сайта ИЗМИРАН <http://cr0.izmiran.ru/common/NetMap00.gif>).

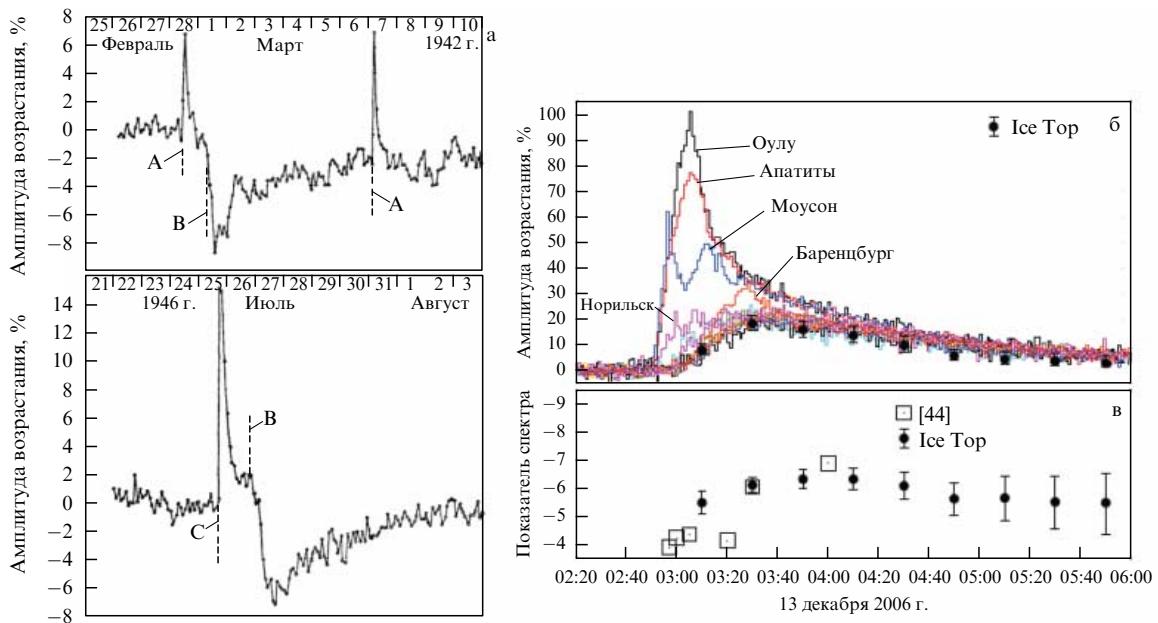
магнитную жёсткость ускоренной частицы  $R_m$ ) фактически на уровне верхнего предела  $R_c$  (т.е. вблизи  $R_c = 17$  ГВ на геомагнитном экваторе). Так, для события 23 февраля 1956 г. (GLE05) (самого большого за всю историю наблюдений) по данным стандартных детекторов была получена оценка  $R_m = 20,0(+10, -4)$  ГВ. Если же использовать данные нестандартных детекторов, то появляется заманчивая возможность продвинуться [41] в область энергий, значительно больших 20 ГэВ. Например, в том же событии GLE05 наклонными мюонными телескопами в Индии удалось зарегистрировать релятивистские солнечные протоны с энергиями в интервале 35–67,6 ГэВ. Наблюдения с помощью подземных МТ, ориентированных в сторону Солнца, указывают на возможность ускорения солнечных протонов до энергий  $E_p \approx 200$  ГэВ [42] и даже до  $E_p \geq 500$  ГэВ [39]. Однако последняя возможность, очень привлекательная теоретически, всё ещё остаётся под сомнением.

События типа GLE (кинетическая энергия  $E_p \geq 433$  МэВ/нуклон, или магнитная жёсткость  $R \geq 1$  ГВ) характеризуют только одну, релятивистскую, часть полного спектра СКЛ. Если энергия первичных протонов  $E < 100$  МэВ ( $R < 0,44$  ГВ), то нейтронные мониторы практически не чувствуют их из-за атмосферного поглощения вторичных нейтронов (порог так называемого "атмосферного обрезания",  $R_a$ ), при этом максимум чувствительности НМ находится в области 1–5 ГВ. Это означает, что все высоколатитудные (полярные) станции начинают эффективно регистрировать вторичные нейтроны при одной и той же жёсткости первичных протонов

$\approx 1$  ГВ, независимо от номинального значения расчётной жёсткости геомагнитного обрезания,  $R_c$ , для данного НМ. К счастью, значение жёсткости  $\approx 1,0$  ГВ ( $\approx 433$  МэВ) оказалось приблизительно посередине между значениями для нерелятивистских и собственно релятивистских СКЛ, и такое значение служит удобным референтным значением в качестве характеристического порога жёсткости для полярных станций НМ [43].

На рисунке 2а приведены временные профили наземных возрастаний СКЛ для первых трёх GLEs [22] по данным ионизационной камеры на станции Челтнем (США). На рисунках 2б, в показано последнее событие 23-го цикла — GLE70 (13 декабря 2006 г.). Примечательно, что оно было зарегистрировано не только мировой сетью НМ (см., например, [44, 45]), но и некоторыми нестандартными наземными детекторами, в частности, широкоапertureным мюонным годоскопом УРАГАН [46], а также детектором широких атмосферных ливней (ШАЛ) IceTop, который является частью нейтринного телескопа IceCube в Антарктиде [47].

Благодаря прямым измерениям с помощью космических аппаратов (КА) вблизи орбиты Земли (на расстоянии 1 а.е. от Солнца) начиная с 1960-х годов стало возможным регистрировать энергичные солнечные частицы (solar energetic particles, или SEPs) в области энергий  $E \geq 0,5$  МэВ/нуклон. Такие случаи регистрации стали называть солнечными протонными событиями (СПС). Как оказалось, частота СПС  $\eta$  резко возрастает при уменьшении пороговой энергии регистрации. Так, если при энергии  $E \geq 433$  МэВ/нуклон ( $R \geq 1$  ГВ) частота ре-



**Рис. 2.** (В цвете онлайн.) (а) Данные наблюдений на станции Челтнем (США) для первых трёх GLEs [22]; А — моменты начала радиофедингов, В — моменты начала магнитных бурь, С — момент начала солнечной вспышки 25 июля 1946 г. (б, в) Результаты наблюдений GLE70 мировой сетью станций (б) и сравнение оценок показателя спектра СКЛ на орбите Земли (в) по данным НМ [44] и детектора ШАЛ ИсеTop, который является частью нейтринного телескопа ИсеCube в Антарктиде [47].

гистрации СПС (GLE) составляет  $\eta \approx 1,0$  год $^{-1}$ , то при  $E \geq 100$  МэВ/нуклон она увеличивается до 2,0 год $^{-1}$ , а при  $E \leq 10$  МэВ/нуклон (для протонов) уже составляет  $\eta \geq 250$  год $^{-1}$ . Снижение порога регистрации, повышение чувствительности детекторов и увеличение продолжительности измерений на КА позволяет заключить, что Солнце фактически является постоянно действующим источником SEPs с энергиями  $E \geq 1$  МэВ/нуклон [13, 20]. При этом можно утверждать, что спектр частиц GLE является продолжением общего спектра СКЛ (начиная примерно с  $E \geq 1-10$  МэВ/нуклон) в релятивистскую область.

### 2.3. Две парадигмы солнечно-земных связей

В начале 1990-х годов в солнечно-земной физике, которая объединяет гелиофизику и геофизику, произошли важные события. Так, к началу 1990-х годов в США была чётко сформулирована феноменологическая концепция корональных выбросов массы (КВМ по-русски, или coronal mass ejection, т.е. СМЕ по-английски). С концепцией КВМ (СМЕ) тесно связана известная парадигма ускорения СКЛ на фронтах ударных волн. Хотя она и не бесспорна, её активно отстаивают многие учёные, особенно в США. Последние отвергают альтернативную (и исторически более раннюю) концепцию ускорения частиц непосредственно во вспышках в процессе магнитного пересоединения (более подробное обсуждение этих вопросов проводится в разделах 4.1–4.4).

Открытие СМЕ побудило некоторых исследователей даже изменить основную парадигму солнечно-земных связей. Так, в работе [48] предлагалось считать СМЕs (а не солнечные вспышки!) основным фактором (причиной) солнечного влияния на Землю, на "космическую погоду" (магнитные бури, ионосферные возмущения, радиационную обстановку вблизи Земли и т.п.). В литературе и на конференциях развернулась большая дискуссия на тему «Миф "солнечная вспышка"» ("The Solar Flare Myth")

(подробнее см., например, [13, 38]). Новая парадигма причинно-следственных связей в солнечно-земной физике сместила солнечную вспышку с её центральной позиции в качестве главной причины возмущений в околоземном пространстве. Вместо неё главной причиной предлагалось считать корональный выброс массы. Вспышки порождают слабые короткие (impulsive) возрастания потоков частиц, тогда как в мощных и длительных (постепенных, gradual) событиях СКЛ ускоряются на фронте ударной волны, связанной с корональным выбросом массы. Автор [48] утверждал, в частности, что постепенные события не имеют фундаментальной связи с солнечными вспышками. Заметим, что хотя СМЕs были открыты ещё в 1971 г., в коллективной статье [49], написанной к 50-летию ИЗМИРАНа (1989), они даже не упоминались: в те годы для КВМ использовался термин "корональные транзисты".

К настоящему времени всё большее число специалистов склоняются к мнению, что вспышки и СМЕ представляют собой две стороны одного и того же явления — взрывного возмущения в атмосфере Солнца с мощным выделением энергии (рис. 3). Совершенно очевидно, что речь идёт о фундаментальной астрофизической проблеме, где важны не только топологические связи магнитных полей вспышки и СМЕ, но и глубокие физические связи между ними (см. также раздел 9.2).

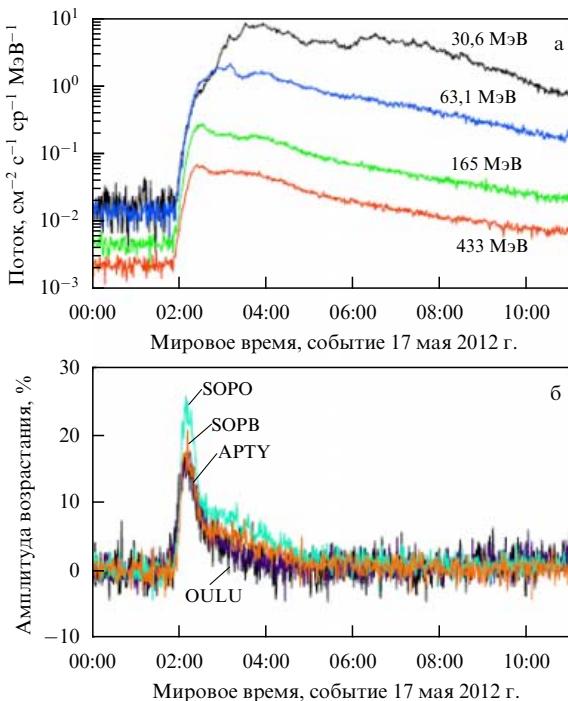
Одной из непременных составляющих взрыва является генерация частиц высокой энергии — солнечных космических лучей (с энергией протонов  $\geq 1$  МэВ). Их часто называют солнечными энергичными частицами (SEPs). Ниже мы будем пользоваться этим сокращённым названием в основном для описания свойств нерелятивистской части СКЛ, тогда как в релятивистской области более уместен термин "частицы GLE". Чтобы избежать путаницы с терминологией, ещё раз подчёркнём, что названия SEPs и СКЛ являются достаточно общими и относятся ко всему разнообразию ускорен-



**Рис. 3.** (В цвете онлайн.) Взрывное выделение энергии в атмосфере Солнца (рисунок художника NASA/MSFC). Яркая вспышка происходит в области пересоединения магнитных полей противоположного направления (красные и синие линии), часть энергии взрыва передаётся корональному выбросу массы (Image credit: NASA/MSFC).

ных солнечных частиц. При этом частицы GLE представляют собой лишь продолжение спектра SEPs в область релятивистских энергий.

На рисунке 4 показано одно из протонных событий текущего 24-го цикла солнечной активности, зарегистрированное 17 мая 2012 г. (GLE71). Оно было небольшим по интенсивности, но его удалось хорошо измерить как наземными детекторами, так и несколькими космическими аппаратами (в частности, WIND, ACE, GOES 13).



**Рис. 4.** (В цвете онлайн.) Временные профили интенсивности СКЛ во время GLE 17 мая 2012 г. по измерениям на борту КА GOES 13 (а) (<http://www.ospo.noaa.gov/Operations/GOES/13/index.html>) и данные наземных нейтронных мониторов (б) (международная база данных NMDB, <http://www.nmdb.eu>).

Начало GLE характеризовалось сильной анизотропией СКЛ.

Комбинируя многоволновые наблюдения изображений взрывающегося протуберанца и СМЕ, авторы [50] получили свидетельства того, что протоны в событии GLE71 с энергией до  $\sim 1,12$  ГэВ могли быть ускорены ударной волной от СМЕ на высоте в короне до  $\sim 3,07$  солнечных радиусов. Хотя этот вывод неоднозначен, примечательно, что спектр у Земли, построенный методом максимальных интенсивностей (time-of-maximum spectrum, или TOM-spectrum) и отражающий спектр СКЛ в источнике, имеет типичную форму, характерную для ускорения на ударной волне.

#### 2.4. Гелиодолготные эффекты

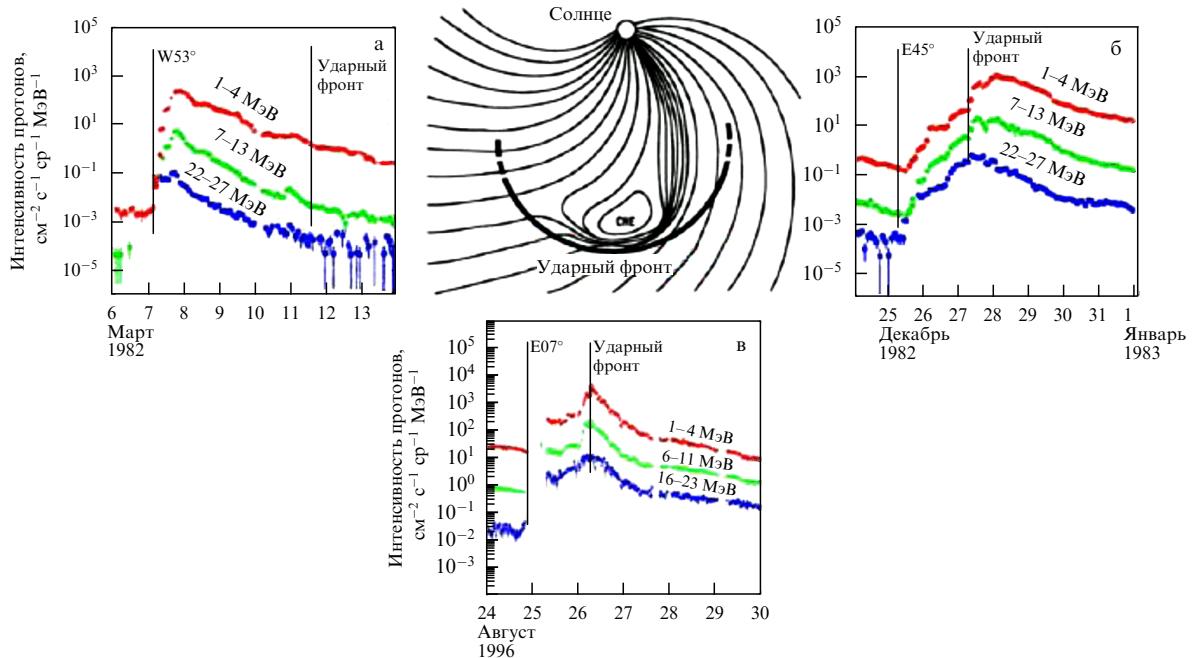
##### в нерелятивистской области

Как следует из сказанного выше, энергичные солнечные частицы могут иметь разные источники на Солнце или вблизи него. При этом абсолютные потоки SEPs, временные профили интенсивности, спектры и угловые характеристики будут меняться от события к событию. Отчасти эти вариации будут определяться взаимным расположением источника частиц и точки наблюдения. Если источником является ударная волна, связанная с СМЕ, то на орбите Земли будет наблюдаваться отчётливая асимметрия в форме временных профилей (рис. 5) в зависимости от того, находится ли источник на западной или восточной гелиодолготе по отношению к СМЕ и ударной волне. Такая картина была получена по данным, накопленным примерно за 20 лет наблюдений для 235 протонных событий с интенсивностью выше  $10^{-2}$  ( $\text{см}^2 \text{ср с МэВ}^{-1}$ ) в диапазоне энергий 1–23 МэВ (для протонов) [51].

Предположим, что наблюдатель видит СМЕ от западного источника ( $W53^\circ$ ). В этот момент точка наблюдения хорошо связана с фронтальной частью ударной волны, которая пока находится вблизи Солнца. К моменту, когда ударная волна достигнет орбиты Земли (1,0 а.е.), наблюдатель окажется на  $53^\circ$  от носовой части волны по направлению к её восточному флангу. В результате он попадает на силовые трубы, которые со временем оказываются связанными с более слабым источником частиц, так что их интенсивность неуклонно уменьшается. Это уменьшение неизбежно вытекает из самой геометрии процесса, даже если скорость и степень сжатия всех частей ударной волны не меняются со временем. Точка магнитного соединения наблюдателя с фронтом волны при этом смещается в восточном направлении.

Наблюдатель вблизи центра ( $E01^\circ$ ) может видеть медленную начальную fazу события, поскольку в этот период он связан с западным флангом волны. Однако если СМЕ имеет большую протяжённость по долготе, то в точке наблюдения будет виден плоский временной профиль, соответствующий почти постоянному ускорению. Непосредственно за фронтом интенсивности уменьшаются на порядок величины или более по мере того, как наблюдатель погружается в собственно СМЕ, где многие силовые линии всё ещё могут оставаться связанными с Солнцем обоими концами.

Наконец, рассмотрим случай, когда наблюдатель находится на западном фланге волны ( $E45^\circ$ ). В этом случае интенсивности могут начать медленно расти по мере того, как волна приближается к основанию силовой

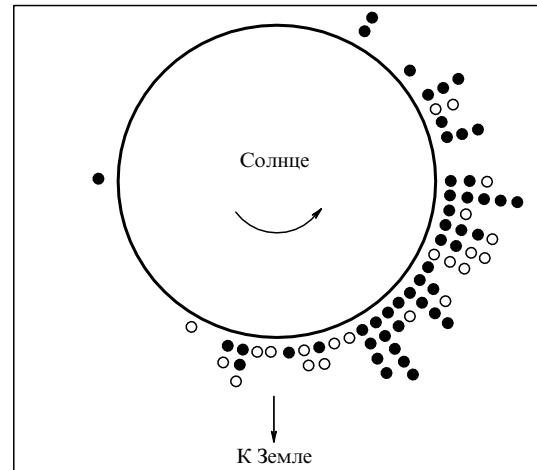


**Рис. 5.** (В цвете онлайн.) Зависимость временных профилей СКЛ у Земли от гелиодолготы источников на Солнце. Типичные временные профили интенсивности SEPs на орбите Земли для трёх протонных событий, наблюдавшихся на различных гелиодолготах по отношению к положению СМЕ и ударной волны [51]. Видна асимметрия профилей в зависимости от положения источника: (а) западная долгота  $W53^\circ$ , (б) восточная долгота  $E45^\circ$ , (в) источник расположен на долготе  $E07^\circ$  (вблизи центра солнечного диска).

линии наблюдателя в короне, далеко к западу от источника частиц. Интенсивности возрастают по мере того, как точка соединения смещается к востоку по направлению к носу волны. Однако пиковые интенсивности будут достигнуты только после того, как наблюдатель пересечёт фронт, в  $45^\circ$  к западу от носа волны, и когда он, в конечном счёте, окажется на силовых линиях, которые свяжут его с носом ударного фронта сзади. Разумеется, и СМЕ, и фронт волны могут иметь нерегулярные искажения формы. Однако представляется достаточно очевидным, что наиболее эффективно частицы будут ускоряться вблизи центральной (носовой) части волны, где она является наиболее сильной, а скорость, скорее всего, наибольшей.

## 2.5. Гелиодолгота источников GLEs

Полная статистика GLEs (71 событие), накопленная за 75 лет наземных наблюдений СКЛ, уже позволяет изучать некоторые вопросы, связанные с пространственно-временными вариациями солнечной активности и свойствами глобального магнитного поля (ГМП) Солнца. Представляет интерес, например, распределение GLEs по гелиодолготе их источников (вспышек). Установлено, что межпланетное магнитное поле (ММП) является направляющим фактором при формировании потоков СКЛ. Хотя релятивистские частицы при движении к Земле, как правило, не претерпевают существенного рассеяния (иногда их транспортный пробег может быть сравним с 1,0 а.е.), но вероятность достигнуть Земли, очевидно, сильно зависит от угла закручивания парковской спирали ММП. Это приводит к довольно сильной зависимости частоты регистрации  $\eta$  от гелиодолготы источника: большинство источников связано с интервалом долгот  $\sim 30^\circ\text{W} - 90^\circ\text{W}$  (рис. 6). Поразительно, однако, что в 12 случаях СКЛ пришли к Земле даже от залимбовых источников. При-



**Рис. 6.** Гелиодолготное распределение по диску Солнца источников GLEs, зарегистрированных в 1956–1991 гг. [52] (тёмные кружки) с авторскими дополнениями [20] для событий, наблюдавшихся ранее 1956 г. и после 1991 г. (светлые кружки), всего 70 событий за весь период наблюдений 1942–2006 гг. (вид со стороны Земли, направление вращения Солнца "восток–запад" указано стрелкой).

мерно такой же вид имеет распределение источников для больших нерелятивистских СПС.

Источники СПС, которые предположительно обусловлены ускорением на ударных волнах в межпланетном пространстве, имеют более однородное распределение, с максимумом на гелиодолготе  $\sim 30^\circ\text{W}$  [17].

## 2.6. Классификация событий

Большое разнообразие СПС (включая GLEs), наблюдавшихся на орбите Земли, по энергетическим спектрам, интенсивностям, содержанию элементов, зарядовому состоянию ускоренных частиц, их временным и пространственным характеристикам (варiations) создаёт

серьёзные трудности в классификации событий. До сих пор лучшей остаётся система количественной классификации по порогу интенсивности, предложенная в начале 1970-х годов [53] для протонов с энергией  $E \geq 10$  МэВ. На основе этой системы были созданы каталоги СПС для периода 1955–2008 гг. [54–60]. Каталоги содержат несколько сотен событий с пороговыми значениями интенсивности  $I(\geq 10 \text{ МэВ}) \geq 1,0 \text{ pfu}$  (proton flux unit;  $1,0 \text{ pfu} = 1 \text{ протон}/\text{см}^2 \text{ с ср.}$ ). С 1976 г. Центр мониторинга окружающей среды США [61] публикует данные спутниковых наблюдений (система спутников GOES) для СПС с пороговым значением интенсивности  $I(\geq 10 \text{ МэВ}) \geq 10,0 \text{ pfu}$ .

В релятивистской области энергий за весь период наблюдений пока (февраль 2018 г.) официально зафиксировано (<http://gle.oulu.fi>) всего 72 события типа GLE (последнее из них наблюдалось 10 сентября 2017 г.). Можно предполагать, что в ранние годы наблюдений (до создания мировой сети станций КЛ) по техническим и методическим причинам некоторые слабые GLEs были пропущены. При их средней частоте  $\eta \sim 1,0 \text{ год}^{-1}$  число пропущенных событий за 1942–1956 гг. могло быть значительным [62]. В последние годы, в связи с развитием теории ускорения СКЛ на ударных волнах от СМЕ (acceleration by CME-driven shocks), интерес к слабым GLEs заметно усилился. Появилось даже особое название для таких "неопознанных событий" — "unidentified, hidden GLEs" [63], или sub-GLEs [64]. К последним, по-видимому, можно отнести некоторые слабые события в прошлом (этот вопрос пока никем не исследовался), а также ряд событий текущего 24-го цикла СА, в частности, событие 6 января 2014 г. от залимбового источника. Оно было зарегистрировано несколькими полярными НМ на пределе их чувствительности (возможно, ему следует присвоить номер GLE72).

В нерелятивистской области времени от времени наблюдаются протонные "суперсобытия" ([20], раздел 12.7.1), которые характеризуются большой длительностью (несколько десятков дней), причём интенсивность протонов с  $E \geq 10$  МэВ слабо меняется с гелиодолготой. Изучение их связей с другими солнечными явлениями указывает [65] на то, что суперсобытия представляют собой наиболее сильные переходные (transient) возмущения гелиосферы. Согласно [65], во время суперсобытий в межпланетной среде почти всегда присутствуют быстрые СМЕs (со скоростью, большей  $400 \text{ км с}^{-1}$ ). Как считают авторы [65], об этом свидетельствует почти 100 % связь между отдельными СПС и такими СМЕs [66].

Особый интерес представляют так называемые "неконтролируемые события", или "события-изгои" ("rogue events") ([20], раздел 5.9). Они напоминают уединённые океанские волны, которые имеют необычно большие амплитуды. Такие события, скорее всего, связаны с ускорением частиц на фронтах множественных ударных волн, порождаемых СМЕ в межпланетном пространстве. Хорошо известными событиями такого рода, в частности, являются СПС, зарегистрированные 17 июля 1959 г., 4 августа 1972 г., 19 октября 1989 г. и 14 июля 2000 г. [67]. Похожие события имели место также 12 ноября 1960 г. [68] и 12 октября 1981 г. [69]. По-видимому, ускорение частиц происходило в этих случаях между фронтами двух сближающихся ударных волн за счёт механизма Ферми первого порядка. Об этом свидетельствует, например, очень крутой спектр СКЛ ([20], рис. 9.4), полученный по

данним НМ для события 4 августа 1972 г. Краткое обсуждение подобных событий в августе 1972 г. и в июле 1959 г. можно найти также в [20, 29].

### 3. Механизмы ускорения, спектр и состав частиц

#### 3.1. Стержневые проблемы физики СКЛ

Отметим две главные, на наш взгляд, "стержневые" проблемы в физике СКЛ, на которые можно "нанизать" все остальные исследуемые и/или нерешённые вопросы. Первая из них — это форма спектра в контексте с механизмом (моделью) ускорения частиц. Аналогично этому, второй стержневой проблемой можно считать элементный состав и зарядовое состояние ускоренных частиц.

Спектр СКЛ в больших СПС может перекрывать 4–5 порядков величины по энергиям (от  $\sim 1$  МэВ до  $\geq 10$ –100 ГэВ). Разница интенсивностей на краях спектра (из-за его большой крутизны в области высоких энергий) может достигать 6–8 порядков величины (см., например, [38]). Это создаёт определённые экспериментальные и методические трудности в измерении потоков СКЛ вблизи Земли (на фоне ГКЛ) и в интерпретации полученных данных. Последнее особенно важно при проверке моделей ускорения. Для определения формы спектра в широком диапазоне энергий необходимо совмещать, как правило, результаты нескольких видов измерений (на поверхности Земли, в стратосфере, на борту КА и т.д.), что вносит свои неопределённости в получаемые спектральные характеристики. По-видимому, именно на "концах" спектра СКЛ (при энергиях  $\leq 1$  МэВ и  $\geq 10$  ГэВ) следует искать ответы на ключевые загадки его формирования.

Наряду с энергетическими единицами (эВ, кэВ, МэВ и ГэВ) исследователи КЛ часто пользуются единицами магнитной жёсткости частиц  $R = cp/Ze$ , которая представляет собой единицу импульса  $p$  на единицу заряда  $Z$  и измеряется обычно в единицах вольт, мегавольт и гигавольт. Связь между энергией и жёсткостью определяется формулами  $E_k + E_0 = [E_0^2 + (ZeR)^2]^{1/2}$  и  $R = [E_k^2 + 2E_k E_0]^{1/2}$ , где  $E_0$  — энергия покоя,  $E_k$  — кинетическая энергия частицы. Жёсткость очень удобна для анализа движения частицы в магнитном поле  $B$ , поскольку она связана простыми соотношениями с ларморовской частотой  $\omega_B = ZeB/mc$ , ларморовским радиусом  $r = v/\omega_B$  и магнитным полем:  $R = \rho B$  ( $m$  и  $v$  — масса и скорость частицы).

#### 3.2. Форма спектра

В узких энергетических интервалах исследователи СКЛ наиболее широко пользуются четырьмя основными формулами для представления спектра — степенными и экспоненциальными функциями от энергии  $E$  или жёсткости частиц  $R$ :

$$D(E) = D_{01} E^{-\gamma}, \quad (1)$$

$$D(R) = D_{02} R^{-\gamma}, \quad (2)$$

$$D(R) = D_{03} \exp\left(-\frac{R}{R_0}\right), \quad (3)$$

$$D(E) = D_{04} \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right). \quad (4)$$

Здесь параметры  $D_{01}$ ,  $D_{02}$ ,  $D_{03}$  и  $D_{04}$  представляют собой соответствующие нормировочные коэффициенты,  $\gamma$  — показатель степени,  $R_0$  и  $E_0$  — характеристические жёсткость и энергия дифференциального спектра соответственно. Параметры  $\gamma$  и  $R_0$  могут изменяться в зависимости от рассматриваемого интервала энергии (жёсткости), а также испытывать временные вариации в течение СПС. Иногда применяются модификации приведённых формул, например комбинация степенной и экспоненциальной функций

$$D(E) = D_{05} E^{-\gamma} \exp\left(-\frac{E}{E_c}\right) \quad (5)$$

с обрезанием спектра при энергии  $E_c$  [70]. Используются и другие, более сложные комбинации, например спектр из двух степенных функций с точкой излома при определённой энергии  $E_b$ . Их многообразие отражает простой факт: спектр СКЛ в широком диапазоне энергий по условиям своего формирования в источнике (источниках) и с учётом эффектов переноса в ММП, по-видимому, не может быть точно описан простыми соотношениями (1)–(5).

В связи с этим предпринимаются попытки эмпирически представить спектр СКЛ исходя из наблюдательных данных и/или из общих физических соображений. На рисунке 7 схематически показан спектр в интервале энергий 0,01 МэВ–1 ГэВ [71], предложенный для описания части наблюдений (в основном для нерелятивистской области). Спектр А описывает распределение частиц в малых событиях, а В — это частицы, ускоренные в большой вспышке в корональном токовом слое (ТС). Вариации спектра в пределах заштрихованной зоны, по мнению автора работы [71], отражают изменения размеров и других параметров ТС. В действительности получить истинный спектр ускоренных частиц в источнике представляется очень сложной задачей [20]. Ударные волны в короне, а затем эффекты переноса ускоренных частиц в ММП, связанные с дисперсией частиц по скоростям, сильно модифицируют наблюдаемый спектр. В результате спектры СПС у Земли отличаются большим

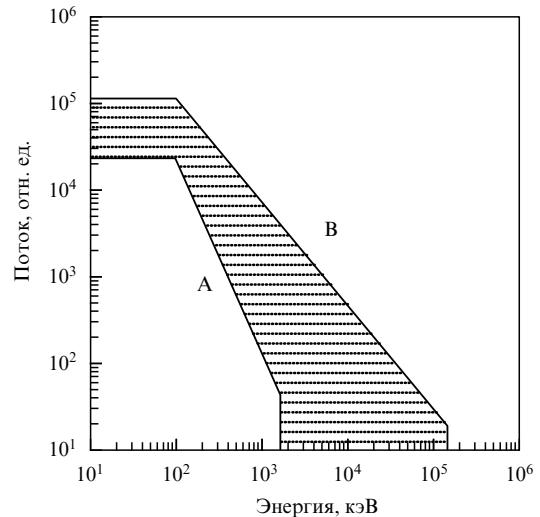


Рис. 7. Спектр ускоренных солнечных протонов, предложенный в работе [71] для согласования данных наблюдений на орбите Земли с предположением об ускорении нерелятивистских протонов в корональном токовом слое. Вариации параметров спектра в заштрихованной области можно объяснить изменениями параметров токового слоя.

разнообразием форм и интенсивностей. Лишь спектр частиц с энергией  $E \geq 500$  МэВ приближённо соответствует спектру источника, и даже такие частицы подвержены некоторому влиянию эффектов переноса. Переменность формы спектра и его "завал" в релятивистской области — одно из фундаментальных свойств СКЛ, и любая теория ускорения, претендующая на полноту, обязана его объяснить.

Для контраста со схематическим спектром (см. рис. 7) приведём спектры для нескольких реальных СПС, изученных в серии работ [72–74]. На рисунке 8а показаны "мгновенные" дифференциальные спектры для трёх событий, измеренных в различных диапазонах энергии вблизи орбиты Земли. Для сравнения приведены также данные трёх космических аппаратов для события 5 декабря 2006 г. Эти последние измерения проводились на

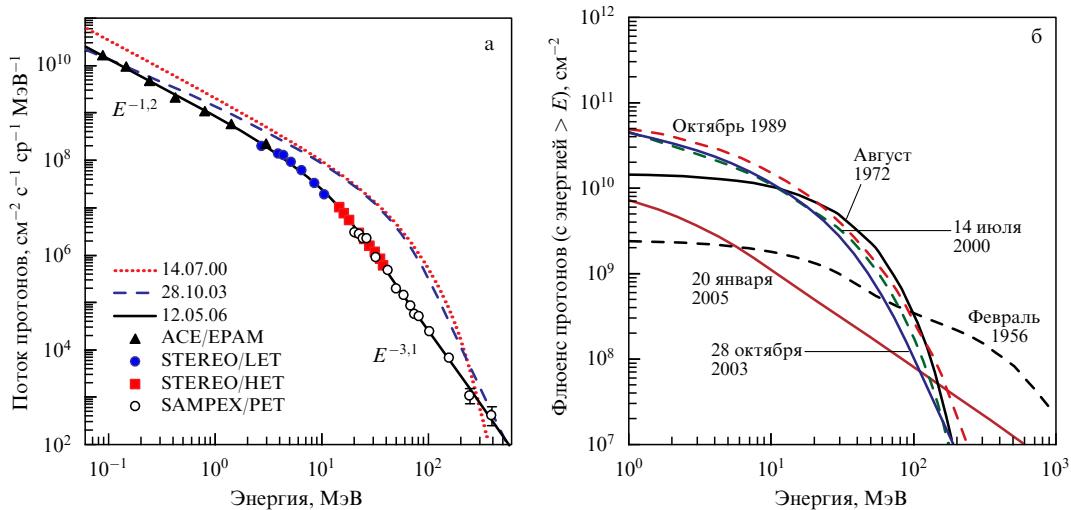


Рис. 8. (В цвете онлайн.) (а) Дифференциальные спектры для нескольких СПС по измерениям на орбите Земли (14 июля 2000 г., 28 октября 2003 г., 12 мая 2006 г.) и на некотором удалении от Земли (5 декабря 2006 г.). (б) Спектры флюенсов протонов для нескольких больших событий 1956–2005 гг. (адаптировано по данным [72–74]).

значительном удалении от Земли (в частности, на КА ACE в точке Лагранжа L1).

На рисунке 8б для нескольких выдающихся СПС показаны интегральные энергетические спектры так называемых флюенсов (флюенс — это поток протонов, интегрированный по всему времени данного события). Эта характеристика СПС важна, прежде всего, для изучения геофизических эффектов СКЛ (например, для расчётов скорости генерации космогенных изотопов в атмосфере Земли, см. раздел 8.2), а также для оценки радиационной опасности вблизи земной орбиты.

Хорошо видны существенные различия между событиями как по форме их спектров, так и по величине флюенса в каждом событии. Спектры имеют чётко выраженный переменный наклон, причём при увеличении энергии спектр становится более крутым, т.е. показатель степени  $\gamma$  зависит от энергии. Объяснение такому поведению пока не найдено. Можно лишь констатировать, что выше энергии излома спектр можно описать степенной функцией с экспоненциальным обрезанием [55]. Согласно [74], такие спектры лучше описываются специфической двойной степенной функцией, предложенной авторами [75].

В следующих разделах 3.3 и 3.4 основное внимание будет уделено релятивистской части спектра СКЛ, поскольку именно здесь, на наш взгляд, находится ключ к пониманию механизмов ускорения частиц и максимальных возможностей солнечного ускорителя (ускорителей).

### 3.3. Максимальная энергия СКЛ

Одной из важнейших характеристик солнечного ускорителя (или ускорителей?) является максимальная энергия СКЛ. В разделе 2.2 мы упоминали о попытках найти (измерить) предельную энергию  $E_m$ , которую может обеспечить ускоритель частиц на Солнце. В частности, были отмечены всплески интенсивности вторичных мюонов на глубине  $\sim 200$  м водного эквивалента [39], где эффективная энергия первичных частиц составляет  $\geq 100$  ГэВ. Эти всплески коррелировали с солнечными вспышками, однако их величина не превосходила уровень 3 $\sigma$ .

Впоследствии на Большом подземном сцинтилляционном телескопе (БПСТ) (Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН) был уверенно зафиксирован так называемый "баксанский эффект" — статистически обеспеченные [39] (с амплитудой до 5,5 $\sigma$ ) кратковременные всплески интенсивности мюонов с пороговой энергией  $E_\mu \geq 200$  ГэВ, что соответствует энергии первичного протона  $E_p \geq 500$  ГэВ. Всплески чётко коррелируют с GLE. К концу 2005 г. в списке мюонных всплесков на БПСТ числилось уже 34 события [76]. Фактически результаты БПСТ дали новый толчок для поисков верхнего предела энергии СКЛ по данным нестандартных детекторов КЛ во многих лабораториях мира. Ниже мы приведём некоторые результаты, полученные разными исследователями за последние годы, в основном для наиболее выдающихся GLEs 23-го цикла солнечной активности. К ним можно отнести события 6 ноября 1997 г. (GLE55), 14 июля 2000 г. (GLE59), 15 апреля 2001 г. (GLE60), 28 октября 2003 г. (GLE65) и 20 января 2005 г. (GLE69).

### 3.4. Предельный спектр СКЛ

Обобщение данных о максимальных потоках СКЛ позволило построить эмпирическую модель "предель-

**Таблица 1.** Параметры предельного спектра СКЛ

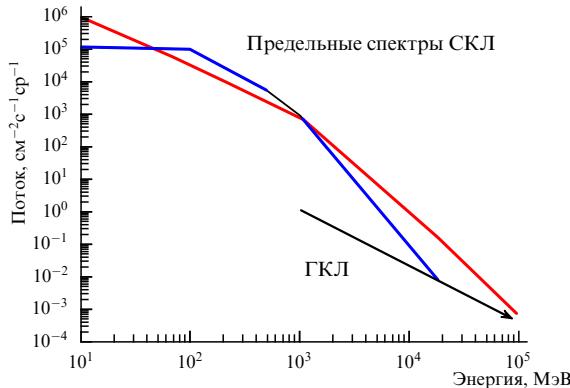
$E_p$ , эВ	$> 10^6$	$> 10^7$	$> 10^8$	$> 10^9$	$> 10^{10}$	$> 10^{11}$
Индекс $\gamma$	1,0	1,45	1,65	2,2	3,6	$> 4,0$
$I(> E_p)$ , pfu	$10^7$	$10^6$	$3.5 \times 10^4$	$8 \times 10^2$	$1.2 \times 10^0$	$7 \times 10^{-4}$

ного" интегрального спектра СКЛ в широком интервале энергий, по крайней мере, между  $E_p \geq 1$  МэВ и  $E_p \geq 10$  ГэВ [41]. Спектр строился по максимальным значениям интенсивности протонов  $I_p(t_m)$  в момент максимума возрастания  $t_m$  у Земли (так называемый time-of-maximum-method, или TOM-method, подробнее см., например, [15]). Спектр можно аппроксимировать несколькими степенными функциями, показатели которых зависят от выбранного диапазона энергии протонов, а именно:  $\gamma = \gamma_0 E^a$ , где  $a = 1,0$  при  $E_p \geq 1$  МэВ [16]. В англоязычной литературе предельный спектр получил название upper limit spectrum, или ULS [77]. Параметры ULS приведены в табл. 1, значения  $I_p(t_m)$  даны в стандартных единицах pfu.

Вопрос о предельной энергии и "предельном" спектре СКЛ рассматривался многими авторами. В частности, в [78] предпринята попытка реализовать общефизический подход с учётом очевидного ограничения: на Солнце должны существовать естественные физические пределы для параметров спектра. Как известно, максимальные интенсивности СКЛ, наблюдаемые в межпланетном пространстве, в первом приближении соответствуют спектру в источнике (по этому поводу см. выше, где упоминается TOM-method). Чтобы оценить предельный спектр СКЛ вблизи Земли, автор [78] использовал спектр в источнике [79], полученный из общих принципов термодинамики безотносительно к конкретным параметрам механизмов ускорения (подразумевается высвечивание частиц "газа" СКЛ, т.е. их убегание из сжимающейся ловушки). При этом дифференциальное распределение СКЛ по энергиям является степенной функцией с показателем  $-3,5$  и  $-5,0$  для случаев нерелятивистского и ультрагрелятивистского "газа" соответственно. Автор [78] нормировал спектр [79] на интенсивность ГКЛ при максимальной энергии солнечных протонов, которая грубо принималась равной 20 ГэВ (что далеко не очевидно, аргументацию см. в разделе 3.5).

На рисунке 9 "эмпирический" [16, 41, 77] и "физический" [78] спектры показаны в сравнении. Основные различия между ними проявляются при самых малых и самых больших энергиях, а именно: по сравнению с [78] спектр [41, 77] даёт завышенные значения интенсивности при  $E_p \leq 50$  МэВ и  $E_p \geq 1$  ГэВ. Причины расхождений пока недостаточно ясны и заслуживают отдельного рассмотрения.

Несмотря на ограниченность экспериментальных возможностей, методическую сложность, скучость наблюдательных данных и теоретические трудности, интерес к проблеме по-прежнему сохраняется ввиду её фундаментального характера. Для сравнения с наблюдениями приведём результаты анализа данных, полученных на спектрометре мюонов высокой энергии в установке "L3 + C experiment" (ЦЕРН) [80] во время события GLE59 (или BDE — Bastille Day Event), которое упоминалось в разделе 2.6 в связи с "событиями-изгоями". Был обнаружен избыток потока мюонов величиной 5,7 $\sigma$ , причём продолжительность эффекта совпала со време-



**Рис. 9.** (В цвете онлайн.) Сравнение двух моделей предельного интегрального спектра СКЛ. Красным цветом показан "эмпирический" спектр [41, 77], синим — "физический" спектр [78], чёрная прямая внизу — интегральный спектр ГКЛ в области энергий  $\geq 1$  ГэВ. Оценки [78] нормированы к потоку ГКЛ при  $E = 20$  ГэВ, которая считается [78] максимальной для СКЛ.

нем, когда наблюдались пиковый поток протонов более низких энергий, рентгеновское и гамма-излучение.

В работе [80] путём моделирования методом Монте-Карло показано, что мюонный всплеск был вызван первичными протонами с энергией  $E_p > 40$  ГэВ, с наиболее вероятной энергией  $\sim 82$  ГэВ. Опираясь на результаты моделирования, удалось оценить верхний предел потока таких протонов  $\sim 2,5 \times 10^{-3}$  pfu. Отметим, что такая интенсивность гораздо выше уровня спектра [78, 79], который в релятивистской области характеризует спектр источника, но хорошо согласуется с предельным спектром [41, 77] при  $E_p \geq 80$  ГэВ (см. рис. 9). Согласно [80], протоны столь высокой энергии были ускорены на импульсной стадии вспышки 14 июля 2000 г. спустя 2 мин после начала всплесков жёсткого рентгеновского и гамма-излучения.

### 3.5. Данные нестандартных детекторов

Авторам [76], кроме увеличения общей статистики мюонных всплесков на БПСТ ("баксанский эффект"), удалось также несколько продвинуться в понимании их природы. Была, в частности, заново оценена максимальная интенсивность первичных протонов, породивших мюонный всплеск 29 сентября 1989 г. (GLE42) (с амплитудой около  $5,5\sigma$ ). Её величина оказалась равной  $I_p(\geq 500 \text{ ГэВ}) \approx (1,5 \pm 0,2) \times 10^{-6}$  pfu. Такое значение, по-видимому, можно удовлетворительно согласовать со спектром быстрой компоненты СКЛ для данного события [35]. Во всяком случае, при интегральном показателе спектра, большем 4,0 (табл. 1), эта оценка не противоречит величине  $I_p(> 82 \text{ ГэВ}) \approx 2,5 \times 10^{-3}$  pfu для события BDE [80].

Таким образом, данные нестандартных детекторов, полученные во время событий GLE, дают очень важные сведения о верхних пределах потоков солнечных протонов в релятивистской области и максимальной энергии СКЛ. Хотя эти данные отрывочны и не поддаются непротиворечивой интерпретации, они ставят вопросы принципиальной важности, в частности: действительно ли на Солнце могут ускоряться частицы до энергий  $E_p \geq 500$  ГэВ, или же мы имеем дело с каким-то специфическим эффектом солнечной модуляции ГКЛ? Эти вопросы поднимались и раньше, но лишь применительно к отдельным GLEs.

Теория ускорения пока не может дать адекватного описания всего спектра СКЛ, особенно при  $E_p \geq 100$  ГэВ, хотя для максимальной энергии имеются весьма простые оценки [81], опирающиеся на модель ТС в короне. Так, для события 23 февраля 1956 г. (GLE05) — самого мощного в релятивистской области — была получена величина  $E_m \approx 250$  ГэВ. Между тем, наблюдения таких событий, как 23 февраля 1956 г., 29 сентября 1989 г., 6 ноября 1997 г. и 15 апреля 2001 г. с помощью нестандартных детекторов, определённо свидетельствуют о наличии солнечных протонов с энергиями  $E_p \geq 10$  ГэВ (и даже  $\geq 100$  ГэВ). Однако пока нет достаточного количества детекторов, способных регистрировать вторичные мюоны от таких протонов. Отметим, что информация об анизотропии приходящих частиц может быть получена лишь при единичных точечных измерениях. Такие измерения осуществить нелегко, хотя и возможно. В настоящее время, однако, ни один мюонный детектор не в состоянии измерять анизотропию СКЛ во время GLEs. В связи с этим авторы [15] обоснованно считают, что несколько наземных или подземных мюонных детекторов, обладающих достаточной чувствительностью по различным направлениям, могли бы идеально дополнить мировую сеть станций НМ.

## 4. Новая концепция GLE

### 4.1. Источник GLE: вспышка и/или СМЕ?

Коренные вопросы о природе GLE, об источниках и механизмах ускорения СКЛ в целом обсуждаются уже несколько десятилетий. Особый интерес вызывает дилемма (см. рис. 3): "вспышка" или "СМЕ"? При этом идёт принципиальная дискуссия о том, какой из активных процессов на Солнце — вспышка, корональный выброс массы или их комбинация — ответствен за генерацию СКЛ. Прямого ответа на этот вопрос, по-видимому, дать невозможно, а косвенные аргументы сторонников той или иной точки зрения пока не приводят к консенсусу. При современном понимании корней проблемы можно лишь констатировать, что взрывная природа выделения энергии в атмосфере Солнца требует быстрого ускорения частиц до высоких энергий.

Такой подход, прежде всего, не противоречит наблюдениям GLEs. Например, даже в случае сравнительно слабого GLE71, зарегистрированного 17 мая 2012 г. (см. рис. 4), возрастание интенсивности на нейтронных мониторах происходило за считанные минуты, тогда как убывание длилось часами. С другой стороны, условию быстрого ускорения хорошо удовлетворяют теоретические модели генерации релятивистских частиц в самих вспышках. Речь идёт о физически прозрачной и хорошо разработанной концепции [82–88] пересоединения магнитных полей в короне Солнца. Развитие и приложение этой концепции к ускорению СКЛ началось в 1960-х годах (см., например, [84–86] и цитируемую там литературу); наиболее полное обоснование она получила в работах [87, 88].

В начале 1960-х годов уже существовало определённое представление о том, что резервуаром огромной энергии, которая высвобождается во время вспышек на Солнце, является энергия магнитного поля, связанная с электрическими токами в солнечной короне. В связи с этим в пионерской работе [82] была рассмотрена общая

нестационарная задача о течениях сжимаемой плазмы в неоднородном двумерном поле с нулевой линией. В результате был получен фундаментальный вывод о том, что течения высокопроводящей плазмы в таком поле приводят к значительной концентрации магнитной энергии и развитию ТС, разделяющего магнитные поля противоположных направлений [82, 83]. Высвобождение магнитной энергии, сосредоточенной в окрестности ТС, возможно в случае быстрого разрушения слоя. Это, в свою очередь, приводит к генерации сильных электрических полей, ускоряющих заряженные частицы. Согласно концепции [82, 83], кумуляция магнитной энергии и образование ТС соответствуют предвспышечной ситуации. Собственно вспышка происходит при разрушении ТС, когда благодаря процессам магнитного пересоединения накопленная энергия преобразуется в тепловую и кинетическую энергию плазмы, в энергию ускоренных частиц (СКЛ) и в энергию излучений различных диапазонов электромагнитного спектра.

Таким образом, в работах [82, 83] была впервые выдвинута идея о том, что во время вспышки реализуется "кумулятивный" механизм ускорения. При этом ускорению подвергаются все частицы, независимо от их свойств, в некоторой выделенной сравнительно малой области плазмы; иными словами, ускорение является пространственно неоднородным. Такой механизм существенно отличается от статистических механизмов ускорения, для которых характерно ускорение небольшой доли частиц, отличающихся от остальных частиц какими-либо параметрами, например начальной энергией, массой или зарядом. При этом автор [82, 83] подчёркивал, что "процесс быстрой диссиляции магнитного поля, который сопровождается появлением частиц большой энергии", носит весьма общий характер. Он может проявляться не только в солнечных вспышках, но и во многих других явлениях в космической и лабораторной плазме. Последнее было вскоре успешно реализовано в лабораторных экспериментах (см., например, [86] и цитируемую там литературу).

В последние годы развитие концепции магнитного пересоединения применительно к ускорению СКЛ происходило как в чисто теоретическом плане (см., например, [87]), так и путём численного моделирования и сравнения с данными наблюдений (см. ниже раздел 4.3). Так, авторы [89] рассмотрели аналитическое решение релятивистского уравнения движения заряженных частиц в пересоединяющем ТС с трёхкомпонентным магнитным полем ( $B_0 \approx 100$  Гс,  $B_{||} \approx 0,1B_0$ ,  $B_{\perp} \approx 5 \times 10^{-4}B_0$ ) и сильным электрическим полем  $E_a$  (до  $\sim 30$  В см $^{-1}$ ), обусловленным процессом магнитного пересоединения. При этом вдоль электрического поля частицы ускоряются до скорости порядка скорости света, а их кинетическая энергия пропорциональна времени, проведённому в слое. Численное решение уравнения для приведённых выше параметров  $B$  и  $E_a$  показывает, что электроны могут быть ускорены за время  $2 \times 10^{-7} - 10^{-3}$  с при размерах области ускорения  $\sim 7 \times 10^2 - 3 \times 10^7$  см; для протонов аналогичные оценки будут соответственно  $10^{-4} - 2 \times 10^{-2}$  с и  $\sim 3 \times 10^5 - 7 \times 10^8$  см. Различным аспектам концепции магнитного пересоединения, включая ускорение частиц в астрофизических условиях, посвящена, в частности, специальная монография [88], где вклад советских (российских) учёных также получил достойное признание.

#### 4.2. Две релятивистские компоненты GLE

Как отмечено в работе [90], события GLEs составляют всего около 15 % от полного числа больших СПС ( $\geq 10$  pfu) в течение цикла СА. Поэтому возникает естественный вопрос: каковы должны быть особые условия на Солнце для генерации GLE? Рассмотрим этот вопрос подробнее, опираясь на современные наблюдательные данные с учётом их возможной интерпретации.

К настоящему времени накоплено немало свидетельств в пользу предположения, что в потоке релятивистских СКЛ во многих случаях GLE присутствуют две компоненты — быстрая (БК) и задержанная, или медленная (МК). Согласно [16, 20], быстрая компонента, скорее всего, связана со вспышкой, а медленная — с СМЕ [91]. С другой стороны, некоторые исследователи находят аргументы в пользу того, что ударные волны, порождаемые СМЕs (CME-driven shocks), являются единственными ускорителями энергичных солнечных частиц SEPs (см., например, [13]), вплоть до частиц GLE [92]. В качестве одного из аргументов часто используются характеристики SEPs с энергиями на 1–2 порядка ниже (в основном протоны с энергией  $\geq 10$  МэВ), чем в случае GLE. Привлекаются также данные по солнечному радио-, рентгеновскому и гамма-излучению, измерения элементного состава SEPs, их спектра и т.п.

Все эти данные с большей или меньшей степенью детальности сопоставляются с характеристиками вспышки и/или СМЕs. Между тем хорошо известно, что появление SEPs на орбите Земли (солнечное протонное событие, или СПС) обусловлено рядом предшествующих, не всегда известных физических процессов. Спектры, временные профили интенсивности и другие характеристики SEPs, наблюдаемые у Земли, без сомнения, подвержены влиянию процессов множественного и/или длительного ускорения в самом источнике [93] и/или их распространения в межпланетном пространстве [20, 94].

Пользуясь общепринятой методикой анализа наземных возрастаний СКЛ [16], авторы [95] провели анализ 35 крупных событий GLEs за период 1956–2006 гг. Методами оптимизации решалась обратная задача: по данным мировой сети станций был восстановлен спектр СКЛ в абсолютных единицах на орбите Земли. В каждом из GLEs, за редким исключением, обнаружено присутствие двух релятивистских компонент: БК с экспоненциальным спектром (4) и МК со степенным спектром (1). Следует отметить, что при определении параметров спектров, к тому же в шкале жёсткостей, форма спектра явным образом не задавалась. Уже затем форма спектров, полученных при решении обратной задачи, определялась по лучшему согласию с одним из двух представлений — экспоненциальным или степенным. В таблице 2 приведены параметры спектров для каждого из 35 событий, причём  $D_{04}$  и  $D_{01}$  имеют размерность м $^{-2}$  с $^{-1}$  ср $^{-1}$ ГэВ $^{-1}$ ,  $E$  и  $E_0$  — ГэВ. Полученные из этих данных средние величины равны  $\langle E_0 \rangle = 0,52 \pm 0,15$  ГэВ,  $\langle \gamma \rangle = 4,8 \pm 0,25$ . Заметим, что временнóе разделение потоков СКЛ на БК и МК и изучение других тонких деталей в отдельном наземном возрастании стало возможным только благодаря высокой точности регистрации GLE с помощью нейтронных супермониторов СНМ-64 [35].

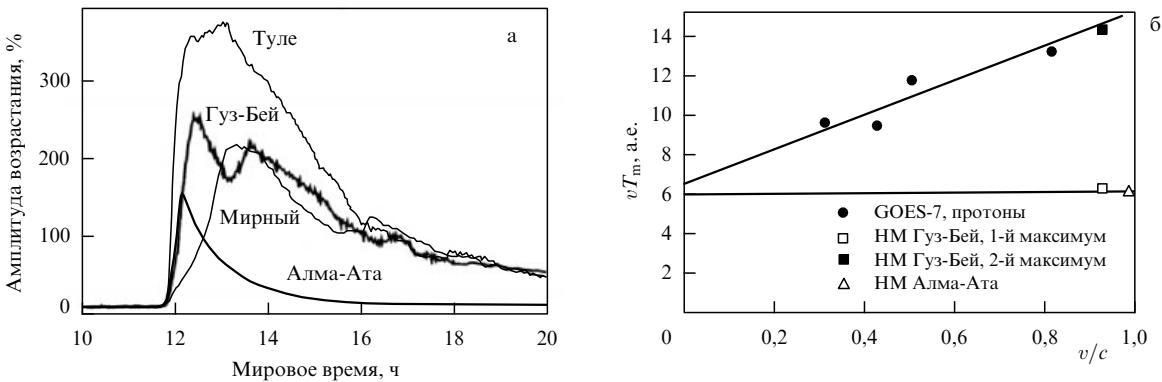
Свойства двухкомпонентных GLE можно наглядно продемонстрировать на примере известного события 29 сентября 1989 г. (GLE42) [38]. Это событие оказалось одним из самых выдающихся за весь период наблюдений

Таблица 2. Спектры двух компонент СКЛ в GLE 1956–2006 гг. [95]

№ GLE	Дата вспышки	Радио II тип UT	Балл вспышки	Положение вспышки	Параметры спектра			
					БК		МК	
					$D_{04}$	$E_0$	$D_{01}$	$\gamma$
05	23.02.1956	03:36	3	N23 W80	$7,4 \times 10^5$	1,37	$5,5 \times 10^5$	4,6
08	04.05.1960	10:17	3+	N13 W90	$2,7 \times 10^5$	0,65	$1,6 \times 10^3$	4,2
10	12.11.1960	13:26	3+	N27 W04	—	—	$7,5 \times 10^3$	4,1
11	15.11.1960	02:22	3	N25 W35	—	—	$1,0 \times 10^5$	5,3
13	18.07.1961	09:47	3+	S07 W59	$5,2 \times 10^3$	0,52	$3,6 \times 10^3$	6,0
16	28.01.1967	07:55	—	N22 W154	$1,4 \times 10^4$	0,58	$6,7 \times 10^3$	4,7
19	18.11.1968	10:26	1B	N21 W87	$1,2 \times 10^4$	0,58	$2,6 \times 10^3$	5,5
20	25.02.1969	09:04	2B/–	N13 W37	$7,7 \times 10^4$	0,38	$4,7 \times 10^3$	5,0
22	24.01.1971	23:16	3B	N19 W49	$3,4 \times 10^4$	0,45	$8,7 \times 10^3$	5,8
23	01.09.1971	19:34	—	S11 W120	—	—	$4,7 \times 10^3$	5,4
25	07.08.1972	15:19	3B	N14 W37	$6,6 \times 10^2$	1,23	$4,3 \times 10^2$	5,0
29	24.09.1977	05:55	—	N10 W120	$6,5 \times 10^2$	1,14	$9,3 \times 10^2$	3,2
30	22.11.1977	09:59	2B	N24 W40	$1,5 \times 10^4$	0,77	$1,1 \times 10^4$	4,7
31	07.05.1978	03:27	1B/X2	N23 W82	$3,5 \times 10^4$	1,11	$1,3 \times 10^4$	4,0
32	23.09.1978	09:58	3B/X1	N35 W50	—	—	$7,0 \times 10^2$	4,7
36	12.10.1981	06:24	2B/X3	S18 E31	$1,7 \times 10^3$	1,21	—	—
38	07.12.1982	23:44	1B/X2,8	S19 W86	$5,7 \times 10^3$	0,65	$7,2 \times 10^3$	4,5
39	16.02.1984	09:00	—	–W132	—	—	$5,2 \times 10^4$	5,9
41	16.08.1989	01:03	2N/X12,5	S15 W85	$6,8 \times 10^3$	0,56	$3,8 \times 10^3$	5,1
42	29.09.1989	11:33	–X9,8	–W105	$1,5 \times 10^4$	1,74	$2,5 \times 10^4$	4,1
43	19.10.1989	12:49	3B/X13	S25 E09	$4,0 \times 10^4$	0,53	$3,0 \times 10^4$	4,8
44	22.10.1989	17:44	2B/X2,9	S27 W31	$7,5 \times 10^4$	0,91	$1,5 \times 10^4$	6,1
45	24.10.1989	18:00	2B/X5,7	S20 W57	$2,4 \times 10^4$	0,72	$1,1 \times 10^5$	4,9
47	21.05.1990	22:12	2B/X5,5	N35 W36	$6,3 \times 10^3$	1,13	$2,7 \times 10^3$	4,3
48	24.05.1990	21:00	1B/X9,3	N36 W76	$2,8 \times 10^4$	0,60	$9,1 \times 10^3$	4,3
51	11.06.1991	02:05	2B/X12,5	N32 W15	$2,6 \times 10^3$	0,83	$3,3 \times 10^3$	4,8
52	15.06.1991	08:14	3B/X12,5	N36 W70	—	—	$5,8 \times 10^3$	4,6
55	06.11.1997	11:53	2B/X9,4	S18 W63	$8,3 \times 10^3$	0,92	$8,2 \times 10^3$	4,6
59	14.07.2000	10:19	3B/X5,7	N22 W07	$3,3 \times 10^5$	0,50	$5,0 \times 10^4$	5,4
60	15.04.2001	13:48	2B/X14,4	S20 W85	$1,3 \times 10^5$	0,62	$3,5 \times 10^4$	5,3
61	18.04.2001	02:17	—	–W120	$2,5 \times 10^4$	0,52	$1,2 \times 10^3$	3,6
65	28.10.2003	11:02	4B/X17,2	S16 E08	$1,2 \times 10^4$	0,60	$1,5 \times 10^4$	4,4
67	02.11.2003	17:14	2B/X8,3	S14 W56	$4,6 \times 10^4$	0,51	$9,7 \times 10^3$	6,3
69	20.01.2005	06:44	2B/X7,1	N14 W61	$2,5 \times 10^6$	0,49	$7,2 \times 10^4$	5,6
70	13.12.2006	02:51	2B/X3,4	S06 W24	$3,5 \times 10^4$	0,59	$4,3 \times 10^4$	5,7

СКЛ (см., например, [20]). Оно было связано с мощным залимбовым источником (вспышка  $\geq X9,8$ ), сопровождалось быстрым КВМ (радиальная скорость  $1828 \text{ км с}^{-1}$ ) и отличалось хорошо выраженным и очень сложным времененным профилем интенсивности по наблюдениям на сети НМ. Это хорошо видно из рис. 10а. Согласно нашему анализу, станции с высокой жёсткостью обреза-

ния (например, Алма-Ата) зарегистрировали только быструю компоненту (БК) с очень жёстким спектром (первая инжекция). Другие станции зафиксировали смешанную картину. Например, данные станции Мирный (Антарктида) свидетельствуют о второй (задержанной) инжекции (МК) с более мягким спектром. На высокочиротной станции Гуз-Бей (Канада) профиль интенсивно-



**Рис. 10.** (а) Временной профиль интенсивности СКЛ в событии 29 сентября 1989 г. (GLE42) по данным НМ на четырёх станциях с различными жёсткостями обрезания ( $R_c$ ): Алма-Ата (6,61 ГВ), Мирный (0,03 ГВ), Гуз-Бей (0,64 ГВ) и Туле (0,00 ГВ). (б) Разделение двух релятивистских компонент в том же событии методом  $vT_m$  [97]; по горизонтальной оси — относительная скорость частиц в долях от скорости света.

сти содержит два отчётливых пика, разделённых временным промежутком около 1 ч.

Первый пик, скорее всего, обусловлен быстрой компонентой, так как по времени он почти совпадает с профилем на станции Алма-Ата. Второй пик, по-видимому, связан со второй инжекцией, поскольку он совпадает с задержанным профилем на станции Мирный. Довольно плоский максимум на станции Туле (Гренландия), вероятно, сформировался в результате наложения быстрой и задержанной компонент. В предположении о существовании двух источников релятивистских протонов уже вблизи Солнца возможная геометрия расположения источников и общий сценарий были впервые описаны в работе [96].

Разделение на две компоненты подтверждается также с помощью простого ТОМ-метода: при умножении скорости частиц,  $v$ , на время максимума их интенсивности у Земли,  $T_m$ , метод фактически даёт расстояние  $S = vT_m$  в межпланетном пространстве, пройденное частицами после инжекции (рис. 10б). Поскольку прямые данные о моменте инжекции отсутствуют, авторы [97] связали начало испускания ускоренных частиц с началом радиовсплеска II типа. Кроме данных наземных нейтронных мониторов, для анализа были использованы также результаты измерений потоков СКЛ на КА GOES 7 в четырёх энергетических интервалах.

На рисунке 10б видно, что данные наблюдений образуют две линейные зависимости. Одна из них, с большим наклоном, объединяет измерения нерелятивистских протонов на КА GOES 7 с данными второго максимума на станции Гуз-Бей. По-видимому, все эти частицы принадлежали к одной популяции МК, которая была задержана в короне. Вторая прямая линия проведена через точки, соответствующие максимуму интенсивности на станции Алма-Ата (БК) и первому максимуму на станции Гуз-Бей. Это означает, что БК состояла только из релятивистских частиц, которые покинули источник практически без задержки.

#### 4.3. Природа источников быстрой и медленной компонент

Как следует из нашего рассмотрения, все значительные GLEs, т.е. события с хорошо развитым временным профилем, демонстрируют чётко выраженную двухкомпонентную структуру: сначала наблюдается БК, а затем

запаздывающая МК. В "классическом" случае GLE42 (29 сентября 1989 г.) временной промежуток между максимумом БК и максимумом МК составил около 1 ч [38]. При наблюдениях БК и МК отличаются друг от друга, соответственно, тремя главными характеристиками: 1) формой временных профилей интенсивности (импульсообразный и плавный), 2) питч-угловыми распределениями (анизотропное и близкое к изотропному), 3) формой энергетических спектров (жёсткий экспоненциальный и мягкий степенной). В частности, в начале события GLE быстрая компонента является сильно анизотропной. Частицы БК предположительно ускоряются в процессах магнитного пересоединения в нижних слоях короны в момент, близкий к взрывной фазе вспышки и началу радиовсплеска II типа, который считается признаком формирования ударной волны в короне и зарождения СМЕ. Частицы МК могут быть ускорены [91] стохастическим механизмом в замкнутых магнитных структурах над областью пересоединения. Затем они выносятся во внешнюю корону при расширении СМЕ.

С начала 1990-х годов предпринимались попытки [81, 91, 98] дать адекватную физическую (модельную) интерпретацию спектров для двух компонент СКЛ с учётом природы их источников на Солнце. Было показано, что вероятным механизмом генерации быстрой компоненты является ускорение электрическим полем, возникающим при магнитном пересоединении в корональных ТС. В результате спектр ускоренных протонов приобретает экспоненциальную форму  $\sim \exp(-E/E_0)$ . В частности, для события 14 июля 2000 г. [98] характеристическая энергия  $E_0$  спектра оказалась равной 0,51 ГэВ (это близко к средней величине  $E_0$  для большинства событий в табл. 2).

В качестве наиболее вероятного источника МК предлагается стохастический механизм ускорения плазменной турбулентностью в возмущённой плазме вспышечного или коронального выброса [91]. Другим возможным механизмом, согласно модели [70], является одновременное ускорение электронов, протонов и альфа-частиц на ударной волне в солнечной короне. Этот механизм представляется эффективным, но лишь в области нерелятивистских энергий. Основным аргументом против ускорения частиц СКЛ на ударной волне до релятивистских энергий служит то, что указанный механизм

даёт жёсткий степенной спектр с дифференциальным показателем  $\gamma = 2,0 - 2,5$  [99], тогда как спектр МК, полученный по наземным данным, имеет средний показатель  $\gamma \approx 5$ . Именно такой показатель был получен в модели стохастического ускорения плазменной турбулентностью [91].

#### 4.4. Ускорение ударными волнами

Механизм сверхадиабатического ускорения на ударной волне был предложен в конце 1970-х годов [99] в основном с целью объяснить форму спектра ГКЛ, основным источником которых считаются взрывы (вспышки) сверхновых звёзд. Первым приложением к проблеме СКЛ стала работа [70], где был рассмотрен упрощённый (линейный) вариант ускорения Ферми первого порядка (или "диффузионного" ускорения [99]) на ударной волне. При некоторых упрощающих допущениях авторами [70] для описания спектра СКЛ было получено выражение (5), которое они считают пригодным для описания как спектра электронов начиная от 100 кэВ, так и протонов GLE с энергией до 10 ГэВ. Заметим, однако, что применительно к генерации СКЛ (т.е. к ускорению в солнечной короне и межпланетной среде) такой механизм имеет серьёзные ограничения [15]. Для его реализации нужна, в частности, так называемая "энергия инжекции" (т.е. предварительное ускорение). Кроме того, согласно некоторым первым оценкам [100], этот механизм обеспечивает максимальную энергию ускоренных частиц лишь порядка 1 ГэВ. Развитие теории данного механизма привело к лучшему пониманию его деталей, физики и способов его моделирования и проверки по данным наблюдений. Был предложен специальный англоязычный термин *diffusive shock acceleration* (DSA). Его смысл состоит в том, что ускорение происходит вблизи фронта ударной волны на неоднородностях (волновой турбулентности) плазмы. Энергия ускоряемых частиц черпается из энергии ударной волны, а турбулентность перед фронтом и позади него обеспечивает удержание частиц вблизи фронта до момента их убегания.

Наиболее детальный и последовательный подход к проблеме, на наш взгляд, был реализован авторами [101, 102] в линейном [101] и нелинейном [102] вариантах теории. С учётом современных полуэмпирических данных о высотном профиле плотности плазмы, а также об уровне и спектре альвеновской турбулентности в короне была получена следующая формула для спектра СКЛ:

$$N(E) = N_0 E^{-\gamma} \exp \left[ - \left( \frac{E}{E_{\max}} \right)^{\alpha} \right]. \quad (6)$$

Здесь  $N_0$  — нормировочный множитель,  $E_{\max}$  — характеристическая энергия спектра. Это выражение содержит степенную часть с показателем  $\gamma \approx 2$  (это сравнимо с оценкой [70] для случая ударной волны) и экспоненциальный "хвост" с параметром  $\alpha \approx 2,3 - \beta$ , где  $\beta$  — показатель степени в спектре альвеновских волн в короне.

Согласно [101, 102], величина  $E_{\max}$  может изменяться в широком диапазоне 1–300 МэВ в зависимости от скорости ударной волны. На примере нескольких СПС авторами [101, 102] было показано, что формула (6) хорошо описывает спектр СКЛ в нерелятивистской области, но, по-видимому, непригодна для описания релятивистской части спектра. Во всяком случае, как отмечено нами ранее [15], при описании спектра выше 1 ГэВ

для GLE42 на поздней, изотропной стадии события 29 сентября 1989 г. (т.е., по существу, только спектра МК), модель даёт довольно неопределённые результаты, сильно зависящие от показателя спектра альвеновской турбулентности  $\beta = 0,5 - 1,5$ . Быстрая компонента, чётко выявленная в событии GLE42 [35], авторами [101, 102] не рассматривалась вообще. В целом подход [101] был критически рассмотрен нами ранее [15].

Одна из последних работ этого направления [103], посвящённая большому GLE65 (28 октября 2003 г.), также не может дать удовлетворительного ответа на все вопросы формирования спектра СКЛ. В этой работе авторы снова анализируют только медленную компоненту СКЛ, зарегистрированную в 14:00 UT, уже в период изотропии события. С приемлемой точностью полученный спектр СКЛ может быть аппроксимирован функцией  $D(E) = 350E^{-1,4} \exp(-E/450) \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ср}^{-1} \text{ МэВ}^{-1}$ . Важно отметить, что в области 4–80 МэВ в наблюдаемом спектре отчётливо виден "горб" (bump). Природа таких особенностей, которые часто наблюдаются при ускорении на фронтах ударной волны в различных астрофизических условиях, неоднократно обсуждалась ранее [101–105]. Однако полной ясности в этом вопросе всё ещё нет.

Среди привлекательных результатов работ [101–103] наиболее важно то, что их авторы дают самосогласованный сценарий ускорения — от генерации ударной волны в короне до формирования спектра СКЛ, причём этот процесс завершается на расстоянии нескольких радиусов Солнца. Например, в упомянутом событии GLE65 процесс ускорения завершился на высоте до  $4R_s$  [103], т.е. ниже области истечения солнечного ветра с поверхности Солнца. Это не противоречит оценкам высоты зарождения ударной волны и формирования СМЕ в работах [101, 102]. С другой стороны, следует отметить, что сильная анизотропия в начале GLE указывает на испускание релятивистских частиц скорее из точечного источника, каковым является собственно вспышка, а не из распределённого по долготе, каковым является ударная волна.

#### 4.5. Роль межпланетного переноса

Гипотеза о существовании двух компонент релятивистских СКЛ была выдвинута в конце 1980-х годов и уже более двух десятилетий в разных вариантах обсуждается в литературе (см. подробности и ссылки в [15, 16]). Так, например, авторы [106] обратили внимание на то, что "двойная структура" временных профилей интенсивности некоторых GLEs проявилась не только в 22-м цикле СА, но и в 19–21-м циклах, например, в событиях 15 ноября 1960 г. (GLE11) и, возможно, 7 августа 1972 г. (GLE25). Станции, где регистрировались такие структуры, были обычно полярными станциями с узкими асимптотическими конусами приёма, "смотревшими" в направлении приходящих первых солнечных частиц. В любом случае первоначальный "когерентный всплеск" (или spike) интенсивности релятивистских солнечных протонов в самом начале GLE может быть более общим явлением, чем думали ранее. В частности, в [107] были представлены свидетельства того, что в событии 22 октября 1989 г. (GLE44) имели место две отдельные инъекции релятивистских протонов от Солнца, разделённые интервалом около 10–20 мин.

В связи с этим особый интерес представляют данные спутниковых измерений в том же событии [108]. Авторы проанализировали временные профили интенсивности

протонов по измерениям на двух геостационарных спутниках в зависимости от энергии протонов. Они обнаружили, что "пик", столь ярко проявившийся в данных нейтронных мониторов, присутствовал и в нерелятивистской области вплоть до энергий  $E_p \approx 15$  МэВ. Вместе с тем, как следует из подробного анализа [35], ничего подобного не наблюдалось на КА GOES-7 во время события 29 сентября 1989 г. Детекторы GOES-7 зарегистрировали событие в нескольких низкоэнергичных каналах, но во всех каналах был зафиксирован только довольно сглаженный (плавный) временной профиль с единственным пиком. Интенсивность начала резко возрастать ранее 12:00 UT и постепенно достигла своего максимального значения. Пик был зафиксирован после 13:00 UT, в зависимости от энергии частиц в данном канале. Важно отметить, что ни в одном из низкоэнергичных каналов не наблюдалось каких-либо особенностей временных профилей, хотя все каналы измеряли частицы с жёсткостями  $< 2$  ГВ. Даже канал с наиболее высокими энергиями в интервале 640–850 МэВ (жёсткость  $R \approx 1,6\text{--}2,3$  ГВ), доступном для наблюдений на НМ, зафиксировал постепенное возрастание до максимума. Этот единственный пик на КА GOES-7 наблюдался в момент, когда на НМ был зафиксирован второй пик. Иными словами, первый пик, наблюдавшийся на НМ, был обусловлен протонами с жёсткостью  $R > 2,3$  ГВ. Если бы GOES-7 "смотрел" в другом (обратном) направлении, такой вывод был бы менее поразительным; в данной ситуации он может лишь указывать на то, что GOES-7 находился в неблагоприятном положении для регистрации первого пика.

Завершая обсуждение природы БК и МК, отметим некоторые теоретические исследования испускания и межпланетного распространения релятивистских солнечных частиц. Так, авторы [109] на основе кинетического уравнения Больцмана для частиц с анизотропным начальным распределением показали, что амплитуды и временные профили, наблюдаемые во время анизотропных GLE, будут зависеть от направления асимптотических конусов приёма излучения нейтронных мониторов по отношению к направлению переноса частиц в ММП. Такой подход был применён [109] к событию GLE48 (24 мая 1990 г.). Оно отличалось сильной начальной анизотропией и имело некоторые признаки двукратной инъекции СКЛ (см. табл. 2). Для описания этих особенностей авторы [109] предположили, что в событии GLE48 имела место длительная инъекция, зависящая от энергии частиц.

Такой подход, однако, представляется нам недостаточным для того, например, чтобы объяснить большое временнéе запаздывание между анизотропным пиком на нескольких наземных станциях и сглаженным изотропным максимумом на других НМ, если только не допустить возможность второй инъекции СКЛ. Заметим, что быстрое увеличение интенсивности (сильная анизотропия) в начале события указывает на прямой доступ релятивистских солнечных протонов на силовые линии, связывающие Солнце с Землёй, и их перенос почти без рассеяния вдоль ММП. Это означает, что межпланетное распространение не может существенно изменить спектр релятивистских протонов. Таким образом, мы рассматриваем полученные выше закономерности для двух компонент СКЛ как следствие процессов ускорения на Солнце.

#### 4.6. Проблема первых частиц GLE

Взрывное высвобождение энергии на Солнце даёт начало вспышке и корональному выбросу массы (СМЕ). Принято считать, что рентгеновское и гамма-излучение связано со вспышками. Радиоизлучение является признаком возмущений и частиц, которые распространяются через корону и межпланетное пространство. Частицы могут приобретать энергию как во вспышках, так и в сопровождающих их волновых и ударно-волновых процессах, например, в ударных волнах, присоединённых к пересоединяющему токовому слою (см. [87], Part II, Ch.3). Поэтому трудно выделить признаки ускорительных механизмов из наблюдений частиц. Однако логично считать, что ранняя фаза событий GLEs находится ближе всего к моменту ускорения, а роль межпланетного переноса минимальна для первых приходящих частиц.

Экстремально большие события обеспечивают наилучшую возможность для изучения ранней фазы благодаря высокому отношению сигнала к уровню шума, а релятивистские солнечные протоны являются наиболее подходящими кандидатами для подхода к проблеме ускорения частиц. ПIONЕРСКАЯ работа по этому вопросу принадлежит авторам [110]. Впоследствии этим вопросом занимались многие исследователи [111–114]. Было, в частности, показано [111, 112], что первые релятивистские частицы покидают Солнце в момент, близкий к максимуму жёсткого рентгеновского излучения и высокоэнергичных гамма-лучей [115]. Эти виды излучений характерны для взрывной фазы вспышки.

В отличие от первых частиц, МК появляется через 10–30 мин после БК, как раз в то время, когда развивается СМЕ. При этом не найдено никакой корреляции между потоками частиц и характеристиками СМЕ. Впереди расширяющегося СМЕ движется ударная волна (радиоисточник II типа). Ударная волна также способна ускорять частицы, производя степенной спектр с показателем  $\gamma \approx 2,5$ . Спектр МК имеет показатель  $\gamma \approx 5$ , более соответствующий стохастическому ускорению [91]. Частицы, захваченные в петлеобразных магнитных структурах внутри расширяющегося СМЕ, ускоряются, взаимодействуя с плазменной турбулентностью. Адиабатические потери (точнее, адиабатическое охлаждение) в такой ловушке оказываются малыми по сравнению с эффектом ускорения [91]. Освобождение частиц из ловушки происходит при выходе СМЕ в верхнюю корону.

Совершенно неожиданный аспект обсуждаемой проблемы первых частиц СКЛ был выявлен недавно [116] при анализе эффектов СКЛ в антисовпадательной защите ACS (сцинтиляционный детектор BGO весом 512 кг), который экранировал спектрометр SPI на борту орбитальной астрофизической обсерватории INTEGRAL. Как известно, временем прихода релятивистских протонов традиционно считают начало наземного возрастания (GLE), зарегистрированное одним из 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 жёсткости геомагнитного обрезания и направления конуса приёма приходящих частиц.

Авторы указанной работы [116] обратили внимание на то, что в некоторых случаях GLEs увеличения скорости счёта 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 января 2005 г. (GLE68) и 13 декабря 2006 г. (GLE70). По амплитуде возрастания эти события были довольно слабыми, при этом задержка прихода релятивистских протонов к Земле относительно всплеска жёсткого рентгеновского излучения считалась значимой, что свидетельствовало о более позднем ускорении протонов. Между тем возрастание темпа счёта ACS SPI, вызванное приходом релятивистских протонов, наблюдалось раньше и соответствовало ускорению СКЛ в момент вспышки. Этот факт подчёркивает 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 слабых GLEs, в двух других экстремально мощных событиях 28 октября 2003 г. (GLE65) и 20 января 2005 г. (GLE69) приход солнечных протонов на ACS SPI наблюдался одновременно с началом анизотропного возрастания на сети НМ, т.е. совпадал с приходом быстрой компоненты СКЛ.

#### 4.7. GLE и состав ускоренных частиц

Как указывалось выше, элементный состав и зарядовое состояние SEPs является одним из двух главных "стержней" проблемы СКЛ в целом. При этом если распределение SEPs по химическому составу определяется так называемым первым потенциалом ионизации (first ionization potential, FIP) "примесных" элементов (C, N, O, Fe, Mg и многих других), то зарядовое состояние зависит в основном от высоты области в короне (т.е. от плотности вещества и его температуры), где происходит ускорение и дальнейшая ионизация ускоряемых частиц (ионов). Данные о тяжёлых ионах (с атомным номером  $Z \geq 2$ ) с учётом широкого диапазона их отношений заряда к массе ( $Q/A$ ), а также отношения обилия изотопов  $^3\text{He}/^4\text{He}$  и отношения содержания элементов (особенно Fe/C или Fe/O) широко используются для расшифровки нескольких сложных процессов, связанных с инжекцией, убеганием и переносом ускоренных солнечных частиц (SEPs).

Более 25 лет назад было предложено (см., например, [51] и ссылки там) делить вспышки и потоки SEPs от них на два класса — импульсные и постепенные (длительные). По значениям ряда параметров можно было установить принадлежность вспышек и соответствующих СПС к тому или иному классу. В настоящее время считается [117], что представление о делении вспышек и потоков частиц от них на два класса является несколько упрощённым, поскольку в некоторых явлениях разных классов наблюдается ряд общих признаков. При сопоставлении потоков частиц от импульсных и длительных вспышек авторы [118] предложили использовать отношение Fe/O в качестве основного показателя для определения двух классов событий.

С другой стороны, величина Fe/O является мерой проявления так называемого FIP-эффекта, суть которого состоит в следующем. Состав элементов в фотосфере, достаточно надёжно определяемый спектроскопическими методами, является вполне однородным по всей солнечной поверхности. Однако содержание примесных

элементов в структурных образованиях короны Солнца и в самом солнечном ветре оказывается в разной степени зависящим от величины FIP по отношению к их концентрациям в фотосфере.

К середине 1980-х годов было установлено [119], что фракционирование примесных элементов по признаку FIP осуществляется в верхней области хромосферы Солнца. Элементы с низким значением FIP ( $< 10$  эВ — Fe, Mg, Si, K и др.) легко ионизуются и под действием пондеромоторной силы альвеновских волн выносятся в верхнюю атмосферу Солнца [120], где указанные ионы способны накапливаться в замкнутых магнитных структурах. Элементы с высоким значением FIP ( $> 10$  эВ — C, N, O и др.) остаются нейтральными, и их содержание не изменяется. Железо относится к элементам с низким первым потенциалом ионизации; их концентрации в верхней атмосфере Солнца повышены в несколько раз. При этом содержание кислорода остаётся близким к фотосферному содержанию, поскольку его FIP превышает 10 эВ [121].

Результаты определения значений Fe/O в потоках ускоренных частиц от различных вспышек приводились ранее во многих работах. При этом значения Fe/O определялись лишь в одном или двух интервалах энергий ионов, что оказывается недостаточным для выявления зависимости Fe/O от энергии. Ниже приведены примеры статистически наиболее обеспеченных работ. Так, используя данные масс-спектрометров с высоким разрешением на борту КА ACE, авторы [122] исследовали средний по событию элементный состав в интервале энергий от  $\sim 0,1$  до  $\sim 60$  МэВ/нуклон в 64 больших СПС 23-го цикла солнечной активности. Было показано, что почти в 64 % случаев значения Fe/O уменьшаются или остаются постоянными с повышением энергии до  $\sim 60$  МэВ/нуклон. Это не противоречит предположению об ускорении частиц на ударной волне от СМЕ на расстоянии 1 а.е., причём эффект зависит от жёсткости частиц.

Такой результат вместе с данными об изломах в спектре для разных ионов (см., например, [123, 124]) указывает на ускорение на фронтах ударных волн как на преобладающий процесс в большинстве крупных СПС 23-го цикла СА. Однако для 36 % событий наблюдается уменьшение величины Fe/O при энергии около 3–10 МэВ/нуклон; это уменьшение сопровождается увеличением при более высоких энергиях. Такое поведение является загадочным (удивительным) и может указывать на другой механизм ускорения, действующий при высоких энергиях (например, на события, обогащённые ионами Fe [125]). Возможно, имеет место (дополнительное) ускорение "затравочной" вспышечной популяции частиц со значениями Fe/O, которые возрастают с ростом энергии (см., например, [126]). Нет сомнения, что могут существовать и другие возможности, но имеющихся данных пока недостаточно для решения этой проблемы в настоящее время.

Ряд аспектов этой проблемы недавно изучали авторы [127]. В этой работе отношения  $e/r$  и Fe/O для ряда GLEs сравнивались с характеристиками соответствующих вспышек и СМЕs. При этом предполагалось, что GLEs представляют собой крайний случай постепенных SEP-событий (СПС), которые обусловлены ударными волнами от широких и быстрых СМЕs. Последние, в свою очередь, связаны с длительными ( $> 1$  ч) всплесками

мягкого рентгеновского излучения (soft X-rays). Выяснилось, однако, что некоторые большие постепенные СПС, включающие GLEs, связаны со вспышками небольшой длительности ( $< 1$  ч). Это сравнимо по длительности с теми импульсными SEP-событиями, в которых наблюдаются повышенное содержание тяжёлых элементов (например, большое отношение Fe/O), высокая степень ионизации частиц (например, иона Fe) и большое отношение  $e/p$ .

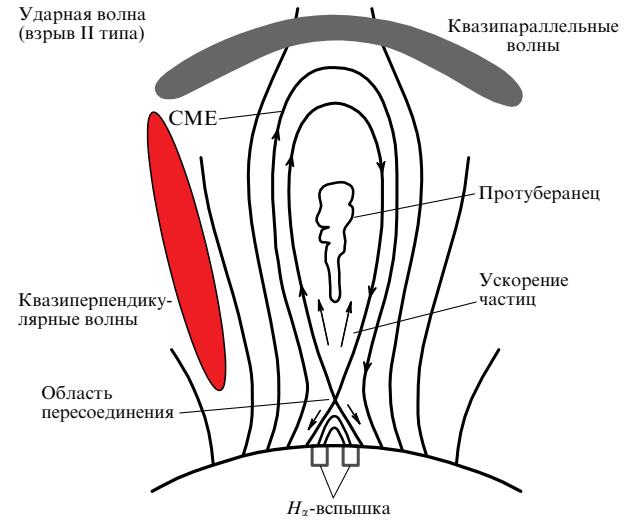
#### 4.8. Состав СКЛ и свойства источников

Чтобы определить, каким образом отношения  $e/p$  и Fe/O, измеренные в двух интервалах энергии, зависят от характеристик активных областей, соответствующих вспышек и CMEs, авторы [127] статистически исследовали 40 событий GLEs, зарегистрированных с 1976 г. Как выяснилось, с увеличением временных масштабов (длительности) вспышек и пиковых потоков мягкого (теплового) и жёсткого (тормозного) рентгеновского излучения, а также с ростом размеров активной области отношения содержания элементов стремятся к более низким и устойчивым корональным значениям.

Эти результаты, по мнению авторов [127], с учётом широкой области "гелиодолгот связи" источников GLEs, в которых наблюдается повышенное содержание более тяжёлых элементов, свидетельствуют против существенной роли вспышечных эффектов в этих GLEs. Более того, согласно [127], низкоэнергичные SEPs, сопровождающие GLEs, ускоряются преимущественно на фронтах ударных волн, вызванных CMEs. Предполагается, что корреляцию состава SEPs со свойствами вспышки могло бы прояснить изучение связи между мощностью и временными характеристиками вспышки и свойствами CMEs. Такой подход соответствует современному взвешенному взгляду на дилемму вспышка–CME (см. рис. 3).

Даже если допустить, что вспышки дают основной вклад в GLEs, то и в этом случае не видно причины для наблюдаемой слабой тенденции к уменьшению отношения Fe/O при повышении фоновых интенсивностей SEPs. Поэтому авторы [127] предпочтывают альтернативную интерпретацию [126]: высокое отношение Fe/O — это признак ускорения на ударной волне (рис. 11), которая вблизи Солнца является квазиперпендикулярной; по этой причине она ускоряет в основном "затравочную популяцию" вспышечных частиц. Поскольку в случае квазиперпендикулярных волн требуется более высокая энергия инъекции, они втягиваются в процесс ускорения в целом меньшую "затравочную популяцию", чем квазипараллельные волны. Поэтому СПС с квазиперпендикулярными волнами вблизи Солнца будут, в общем, характеризоваться меньшими флюенсами протонов, по крайней мере, при более высоких энергиях, которые были достигнуты тогда, когда волна находилась ближе к Солнцу.

Возвращаясь к рис. 11, добавим, что к настоящему времени накоплен большой архив схематических изображений топологии магнитных полей в короне применительно к проблеме ускорения частиц на Солнце. Эти схемы, при всей их условности, тем не менее могут пролить свет на причину различий элементного состава и зарядового состояния ускоренных солнечных ионов. С 1948 г. по настоящее время число таких изображений приблизилось к 250 (см. <http://solarmuri.ssl.berkeley.edu/~hhudson/cartoons/>). Необходимо отметить также, что



**Рис. 11.** Схема для описания возможного ускорения частиц квазипараллельными и квазиперпендикулярными ударными волнами в атмосфере Солнца [26]. В стандартной модели для эруптивных вспышек магнитное пересоединение в следе СМЕ даёт начало двухленточной вспышке. Если эти вспышечные частицы покидают СМЕ, они могут стать затравочными частицами для последующего ускорения на ударной волне.

схема, представленная на рис. 11, явилась результатом длительной эволюции самой концепции вспышки [26]. На эту эволюцию, несомненно, оказали влияние открытие СМЕ в 1971 г., разработка основ теории ускорения на ударных волнах (конец 1970-х годов), появление новой парадигмы о преобладающей роли СМЕ в солнечно-земных связях (начало 1990-х годов) и многие другие факты из области космофизики.

К этой весьма изысканной, но довольно противоречивой картине можно добавить результаты работы [93]. В работе [93] была предпринята попытка разделить восстановленные спектры испускания солнечных протонов в зависимости от их источников (импульсные или постепенные вспышки, ударные волны от СМЕs). На примере нескольких СПС (включая выдающееся GLE42) было обнаружено, что восстановленное число ускоренных частиц, "оседающих" в атмосфере Солнца и вызывающих всплески гамма-излучения в линиях, оказывается систематически меньше, чем соответствующее число убегающих частиц, регистрируемых у Земли в виде SEPs. Этот важный факт пока остаётся до конца не исследованным.

В результате рассмотрения проблемы в целом мы склоняемся к мнению, что физическая связь между вспышками, СМЕs и GLEs, несомненно, существует. Однако закономерности этой связи не являются строго детерминированными. Скорее всего, они укладываются в концепцию "синдрома большой вспышки", которая была предложена 35 лет назад [128] и поддержана некоторыми исследователями (см., например, [129, 130]). Отчасти эту точку зрения разделяют и сами авторы [127]: «В этом сценарии тенденция к снижению отношения содержания элементов с ростом плотности потоков мягкого X-излучения и радиоизлучения на частоте  $\sim 9$  ГГц может быть интерпретирована в терминах "синдрома большой вспышки" [128], который сводится к тому, что все излучения эруптивного события меняют свой масш-

таб вместе, в данном случае это флюенсы SEP и пиковые потоки электромагнитных излучений вспышки».

#### 4.9. Гамма-излучение вспышек

Энергичные частицы, ускоряемые в атмосфере Солнца, несут на себе печать всех свойств той среды, где происходит ускорение, и всех процессов, в которых они начинают участвовать. Так, например, элементный состав и энергетический спектр СКЛ отражают, соответственно, состав солнечной атмосферы и особенности механизмов ускорения. Далее, кроме потерь энергии в ионизационных столкновениях с веществом атмосферы, ускоренные частицы теряют энергию на генерацию различного рода электромагнитных волн — от ядерного гамма-излучения до километровых радиоволн. При этом из-за различия масс у электронов и ионов природа и темп их энергетических потерь совершенно различны. Электроны теряют энергию в основном на ионизацию среды и генерацию тормозного рентгеновского и синхротронного радиоизлучения, тогда как протоны, кроме ионизации, участвуют преимущественно в ядерных взаимодействиях на уровне хромосферы и фотосферы, где рождается множество вторичных частиц (нейтроны, позитроны, пионы и др.), а также происходит генерация солнечного гамма-излучения (рис. 12).

Теоретические расчёты показывают (ссылки и подробности см., например, в [20]), что наибольший вклад в генерацию ядерных линий вносят ускоренные протоны и альфа-частицы с энергиями  $\sim 1 - 100$  МэВ/нуклон. В ядерных взаимодействиях СКЛ рождаются также вторичные нейтроны, электроны и позитроны. Аннигиляция электронов и позитронов в фотосфере приводит к рождению квантов с энергией 0,511 МэВ. При захвате нейтронов ядрами водорода в фотосфере испускаются гамма-кванты с энергией 2,223 МэВ (так называемая линия нейтронного захвата). Наконец, если энергия налетающего протона превышает 300 МэВ, то рождаются пионы, которые при распаде также дают гамма-кванты, но уже значительно большей энергии ( $> 90$  МэВ). Для генерации вспышечных нейтронов с энергией  $\geq 1$  ГэВ необходимы большие потоки солнечных протонов с

энергией до  $\leq 100$  ГэВ. Все эти виды ядерных излучений, включая нейтроны, часто называют нейтральным излучением вспышек.

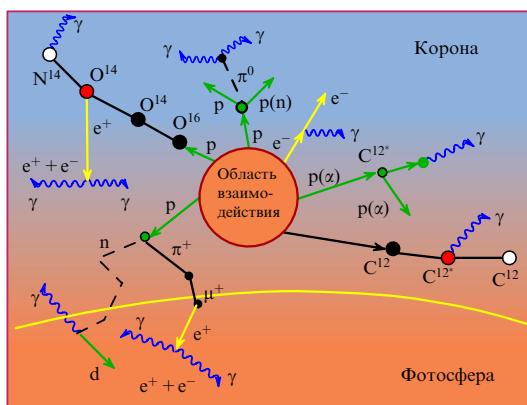
Хотя данные о спектрах СКЛ в источниках пока недостаточно точны, важно отметить, что ускоренные протоны, альфа-частицы и другие ионы обладают достаточной энергией, чтобы привести в возбуждённое состояние ядра различных элементов в атмосфере Солнца, особенно ядра C, N, O и Fe (см. рис.12). Снятие возбуждения происходит путём испускания гамма-квантов определённой энергии. Излучение наблюдается обычно в виде узких линий, характерных для тех или иных ядер, причём отдельные ядра могут испускать по несколько линий.

Число испускаемых линий и их интенсивность зависят от заряда ядра, типа налетающей частицы и её энергии. Например, ядро углерода даёт наиболее интенсивную линию с энергией 4,444 МэВ при столкновении с ускоренной альфа-частицей. Одна из линий от ядра азота с энергией 5,105 МэВ (не самая интенсивная) образуется при столкновении с ускоренным протоном. В случае ядра кислорода интенсивная линия с энергией 6,129 МэВ возбуждается при столкновении с быстрыми альфа-частицами и протонами с почти одинаковой вероятностью и т.д. Возбуждённое ядро железа также испускает несколько интенсивных гамма-линий, среди которых наибольший интерес представляют линии с энергиями 0,847, 1,238 и 1,811 МэВ.

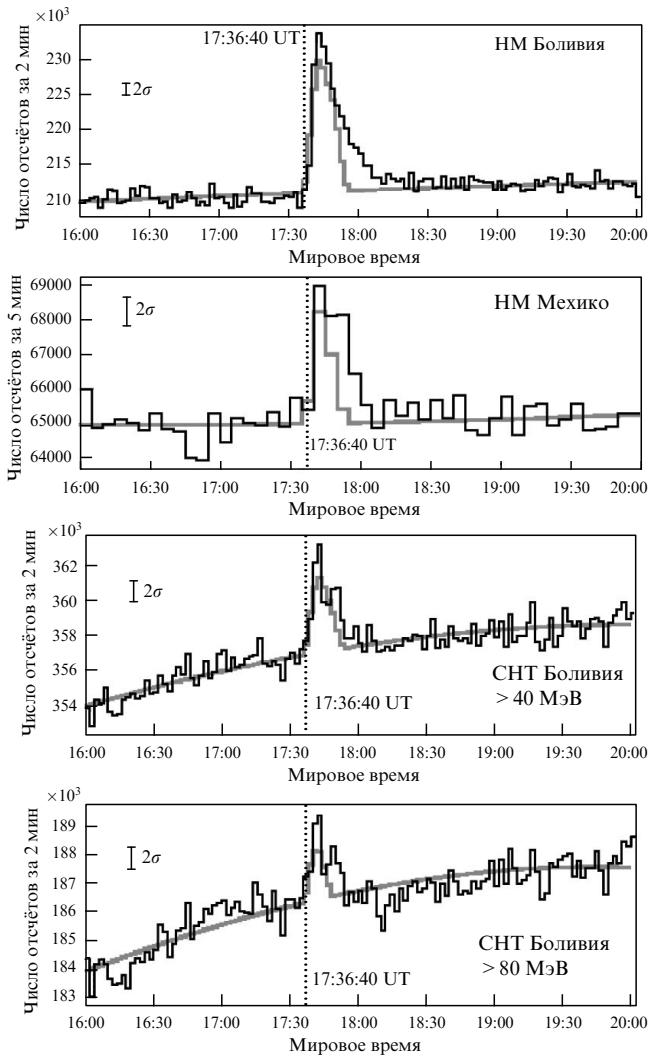
#### 4.10. Солнечные нейтроны

Как известно, нейтральное излучение солнечных вспышек, включая нейтроны, было теоретически предсказано задолго до его обнаружения (см., например, [8]). Вспышечные нейтроны были впервые зарегистрированы на спутнике SMM 21 июня 1980 г. Регистрация солнечных нейтронов высокой энергии (до 400 МэВ) в редких случаях возможна и на поверхности Земли с помощью глобальной сети стандартных нейтронных мониторов. В конце 1990-х годов была создана также мировая сеть из 5 СНТ. Полная статистика нейтронных событий, однако, не превышает 30 случаев почти за 30 лет исследований. Одно из самых выдающихся событий произошло 7 сентября 2005 г. В момент вспышки в наиболее благоприятном положении (полдень в подсолнечной точке) находились детекторы нейтронов в западном полушарии Земли (рис. 13).

Во время мощной вспышки 4 июня 1991 г. по данным нестандартных детекторов были получены свидетельства того, что на Солнце могли рождаться нейтроны с энергией  $\geq 10$  ГэВ [131], что соответствует энергии ускоренных протонов, по крайней мере,  $E_p \geq 10$  ГэВ. Отсюда ясно, что наземные наблюдения солнечных нейтронов могут быть цennыми источниками информации об ускорении заряженных частиц на Солнце до высоких энергий. Наземные возрастания интенсивности космических лучей, вызванные приходом прямых солнечных нейтронов, являются единичными событиями в каждом солнечном цикле, поэтому их поиск и интерпретация представляют интерес. Их регистрация наиболее вероятна высокогорными нейтронными мониторами, расположенными в местах с высокой геомагнитной жёсткостью обрезания (т.е. при минимальном фоне ГКЛ), около полудня местного времени при минимальной толщине атмосферы. Одно из преимуществ наземной регистрации нейтронов



**Рис. 12.** (В цвете онлайн.) Схема ядерных реакций в солнечной атмосфере под действием СКЛ ( $> 10$  МэВ/нуклон) (Котов, 2009). Ядерные реакции сопровождаются генерацией множества вторичных частиц: электронов и позитронов, протонов и нейтронов — а также генерацией интенсивного гамма-излучения (в том числе в линии захвата нейтронов ядрами водорода с энергией 2,223 МэВ). (Рисунок предоставлен Ю.Д. Котовым, МИФИ, Москва, 2009.)



**Рис. 13.** Регистрация солнечных нейтронов от вспышки 7 сентября 2005 г. [134]. На панелях сверху вниз показаны 2-минутные данные НМ на горе Чакалтай (Боливия), 5-минутные данные НМ на станции Мехико, 2-минутные данные боливийского СНТ в каналах с пороговыми энергиями нейтронов  $> 40$  и  $> 80$  МэВ.

от вспышек состоит в том, что солнечные нейтроны не подвержены влиянию межпланетных условий. При этом, однако, их поток будет максимальным только в подсолнечной точке на поверхности Земли. Правда, часть нейтронов распадаются на пути к Земле и выбывают из потока. Тем не менее самые энергичные из них (с энергией порядка десятков и сотен МэВ) могут быть детектированы наземной сетью НМ и СНТ.

Нейтроны от солнечных вспышек неоднократно наблюдались мировой сетью нейтронных мониторов (см., например, [20] и цитируемую там литературу). В частности, очень интересное нейтронное событие зарегистрировал НМ на горе Норикура (Япония) 4 июня 1991 г. [132] после мощной вспышки балла X12,0/3B ( $N30^\circ$ ,  $E70^\circ$ ). Характерно, что в темпе счёта НМ Норикура удалось выделить два максимума — в 03:41–04:10 и в 04:15–05:05 UT. Хотя временной промежуток между двумя пиками невелик, детальный анализ события с привлечением временных профилей интенсивности гамма-излучения с энергией 2,223 МэВ (орбитальная обсерватория CGRO/OSSE) и микроволнового радиоизлучения (об-

серватория Нобеяма) позволил авторам [133] сделать вывод, что процесс генерации нейтронов мог быть длительным. Во всяком случае, можно утверждать, что имел место второй эпизод ускорения частиц на Солнце примерно через 30 мин после импульсной фазы вспышки. В это время фронт СМЕ находился далеко от Солнца, и протоны, ускоренные на ударной волне, не могли генерировать наблюдаемые нейтроны. В статистику 72 GLEs это событие не попало, но на орбите Земли было зарегистрировано небольшое СПС с максимальной интенсивностью  $\sim 325$  pfu в области энергий  $> 10$  МэВ [59].

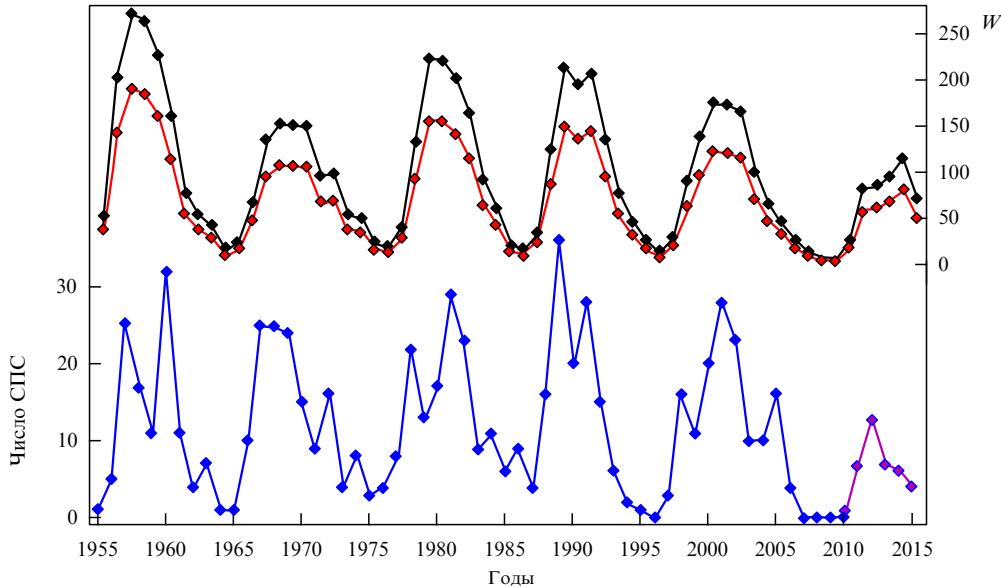
Имеются свидетельства того, что солнечные нейтроны были зарегистрированы во время GLE69 (20 января 2005 г.) [133]. Но особый интерес представляет нейтронное событие 7 сентября 2005 г. [134], измеренное с высокой статистической точностью (см. рис. 13). Событие было обусловлено гигантской вспышкой балла 3B/X17 ( $S06^\circ$ ,  $E89^\circ$ ). Максимум мягкого рентгеновского всплеска был зафиксирован на КА GOES 11 в 17:40 UT, а начало радиовсплеска II типа — в 17:42 UT. По данным детектора на ИСЗ GEOTAIL, всплеск жёсткого рентгеновского излучения ( $> 50$  кэВ) достиг максимума в 17:36:40 UT. В то же время космическая обсерватория INTEGRAL зарегистрировала гамма-излучение с энергией вблизи 1 МэВ. Поскольку при этом ядерные линии не были отчётливо обнаружены, наблюдавшееся гамма-излучение можно приписать ускоренным электронам высокой энергии. Условия наблюдений оказались наиболее благоприятными для нейтронных мониторов и солнечных нейтронных телескопов в странах Латинской Америки.

На рисунке 13 показаны результаты наблюдений в Мексике и Боливии. Хорошо видны, прежде всего, нейтронные пики на нейтронных мониторах в Мехико (Мексика) и на горе Чакалтай (Боливия), 5- и 2-минутные данные соответственно. Приведены также 2-минутные показания двух энергетических каналов СНТ в Боливии для нейтронов с энергиями  $> 40$  МэВ и  $> 80$  МэВ. Момент 17:36:40 UT соответствует времени максимума для потока жёсткого рентгеновского излучения по измерениям на спутнике GEOTAIL. Кривыми серого цвета показаны ожидаемые (расчётные) скорости счёта нейтронов, полученные на основе данных нейтронного монитора в Боливии.

Важно отметить, что в 17:23 UT 7 сентября 2005 г. был обнаружен выброс СМЕ в восточном направлении. По-видимому, из-за сильно восточного расположения вспышки протоны релятивистской энергии не достигли окрестностей Земли и "классического" GLE зарегистрировано не было. Однако по данным NOAA SEC (NOAA Space Environment Center, <http://www.sec.noaa.gov/>) около 02:15 UT 8 сентября на орбите Земли началось довольно сильное СПС, причём поток протонов  $> 10$  МэВ достиг максимального значения 1880 pfu 11 сентября в 04:25 UT.

## 5. Долговременные вариации

В этом разделе мы рассмотрим некоторые особенности СПС, характеризующие поведение потоков и флюенсов СКЛ различной энергии на долговременной шкале. Нас будут интересовать, в частности, 1) годовые вариации числа СПС для протонов с энергией  $\geq 10$  МэВ за период 1955–2015 гг.; 2) распределение событий СКЛ во вре-



**Рис. 14.** (В цвете онлайн.) Среднегодовые значения числа СПС,  $N_y$ , [135] для протонов с энергией  $> 10$  МэВ и максимальной интенсивностью  $> 1$  pfu (нижняя синяя кривая) в сравнении с индексом СА за период 1955–2015 гг. (две верхние кривые). Индекс СА представлен двумя шкалами — старой (число Вольфа  $W_y$ ) и новой (sidc.oma.be), красные и чёрные символы соответственно. Число СПС для солнечного цикла 24 (лиловые символы) оценено в соответствии с критерием NOAA SEC ([www.swpc.noaa.gov/ftpdir/indices/SPE.txt](http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/indices/SPE.txt)).

мени для энергий  $\geq 10$ ,  $\geq 100$  и  $\geq 500$  МэВ за весь период наблюдений; 3) поведение частоты регистрации GLE (1942–2015 гг.).

### 5.1. Годовые вариации числа СПС

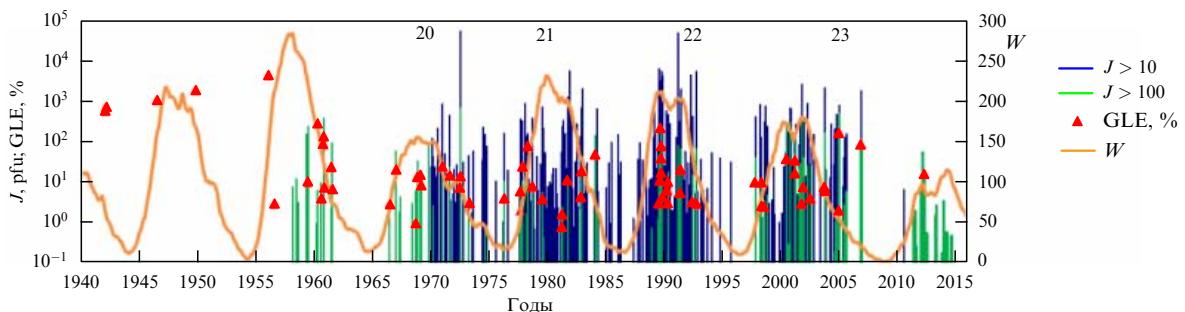
На рисунке 14 показано поведение среднегодовых значений числа СПС,  $N_y$ , для протонов с энергией  $\geq 10$  МэВ в сопоставлении с уровнем солнечной активности (число солнечных пятен  $W_y$ ). Значения  $N_y$  были оценены в [135] в основном по данным нескольких каталогов СПС [54–60]. Для периода 2010–2015 гг. (24-й цикл СА) были использованы данные о протонных событиях, полученные по критерию SEC NOAA ( $\geq 10$  pfu) [61]. Индексы солнечной активности  $W_y$  приведены в двух шкалах — традиционной (числа Вольфа) и новой, недавно предложенной (<http://sidc.oma.be>).

Несмотря на ряд методологических трудностей, связанных с отбором событий в период до начала "эры космических аппаратов" (1955–1965 гг.), некоторые особенности в поведении годового числа СПС проявляются достаточно отчётливо. В частности, отметим так называемый эффект "Gnevyshev Gap"— наличие двухпикововой структуры на временному профиле величины  $N_y$ , т.е. вре-

менной депрессии ("провала"), близкого к максимуму СА. Этот эффект был назван в честь советского астронома [136], который инициировал исследование двухпикововой структуры циклов СА. Приведённые выше результаты определённо представляют большой интерес для изучения общей "протонной светимости" Солнца и долговременных трендов в поведении солнечных магнитных полей. Кроме того, данные рис. 14 могут оказаться очень полезными при разработке методов долгосрочного прогноза радиационных условий в космосе (см., например, [137]).

### 5.2. Распределение событий СКЛ во времени

По данным имеющихся каталогов СПС можно построить также картину поведения амплитуды СПС в зависимости от уровня СА для солнечных частиц различной энергии. На рисунке 15 показаны распределения событий при энергии протонов  $\geq 10$  МэВ,  $\geq 100$  МэВ и  $\geq 433$  МэВ (GLE) за периоды соответствующих наблюдений [138]. Для протонов  $\geq 10$  МэВ и  $\geq 100$  МэВ приведены абсолютные значения максимальных потоков в единицах pfu, а для событий GLE их величина дана в процентах к предвспышечному уровню интенсивности ГКЛ.



**Рис. 15.** (В цвете онлайн.) Распределение событий СКЛ с различной энергией по времени (Базилевская, 2016, Всероссийская конференция по космическим лучам, Дубна, август 2016 г.). Адаптировано из [138].

Рисунок 15 хорошо отражает как историю исследований СКЛ (например, явные пропуски слабых событий GLEs на ранних этапах их изучения), так и особенности частоты регистрации СПС (включая GLEs) в зависимости от уровня СА, изменения методов и развития техники наблюдений. В частности, обращает на себя внимание "слабость" Солнца в 24-м цикле активности как по числу солнечных пятен, так и по количеству "обычных" СПС (см. также рис. 14), и особенно по числу GLEs.

### 5.3. Частота регистрации GLEs

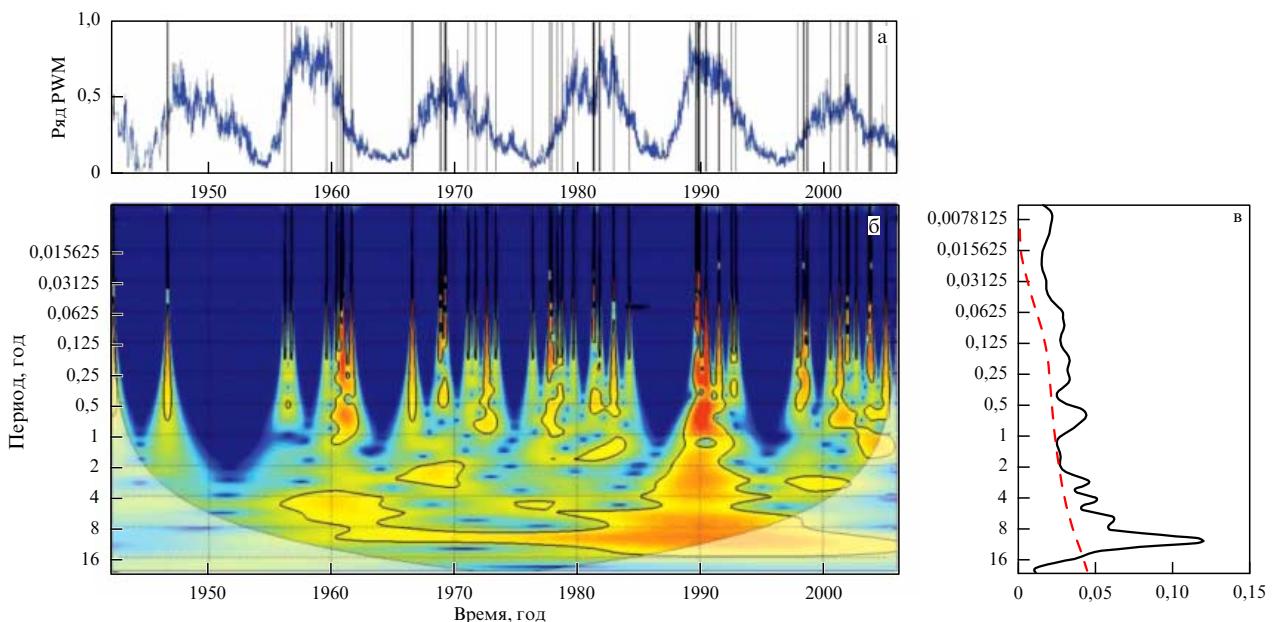
Ещё один интересный аспект, характеризующий Солнце как звезду, был выявлен в результате вейвлет-анализа частоты регистрации GLEs  $\eta$  в зависимости от уровня СА (по числу пятен) и эпохи солнечного цикла [139]. По датам регистрации GLEs методом Морле (Morlet, pulse width modulation — PWM) нами был построен ряд для PWM параметра  $\eta$ , который содержит статистически значимую осцилляцию с периодом примерно 11 лет (рис. 16), амплитуды остальных осцилляций сравнимы с уровнем шума. При этом осцилляции  $\eta$  находятся в определённом сцеплении (когерентности) с временным рядом параметров фотосфера (числом пятен  $S$ ) и короны (корональным индексом СI). Поскольку основным источником больших GLEs являются солнечные вспышки, следует, по-видимому, ожидать подобной когерентности при использовании также индекса солнечных вспышек (solar flare index, SFI), который, наряду с корональным индексом СI, служит одной из косвенных (proxy) характеристик уровня СА (см., например, [140]). Несмотря на ограниченность статистики GLEs и пределов применимости метода вейвлет-анализа, эти результаты могут представлять интерес для понимания поведения ГМП Солнца и квазипериодических явлений в солнечном динамо, солнечной атмосфере, межпланетной среде и космических лучах.

Как было установлено ранее, GLEs имеют тенденцию группироваться в основном на восходящей и нисходящей ветвях солнечных циклов (см. рис. 15, а также рис. 16а). Это свойство, по-видимому, обусловлено особенностями пространственно-временной структуры ГМП Солнца. Как известно, как раз вблизи максимумов СА происходит смена его знака. В связи с этим отметим результаты работы [141]. Для анализа указанной тенденции GLE авторы [140] использовали данные МТ и НМ для 43 GLE за период 1942–1990 гг. Было показано, что вспышки, вызывающие GLEs, по существу, являются запрещёнными во время переходной фазы цикла, когда происходит изменение знака ГМП Солнца. Отсутствие GLEs точно в максимуме СА авторы объясняют не угнетением процессов выхода СКЛ из-за сильных магнитных полей, а ухудшением эффективности ускорения частиц во время структурной перестройки ГМП.

Поскольку некоторые периодичности, найденные в работе [139], являются когерентными для параметров  $\eta$ ,  $S$  и СI, на данной стадии исследования вопроса можно сделать вывод, что имеет место синхронизация осцилляций в различных слоях солнечной атмосферы — от фотосферы до короны. Это может свидетельствовать о том, что генерация СКЛ (GLE) является не локальным (изолированным) процессом, а затрагивает большие области в атмосфере Солнца.

### 6. Функции распределения событий

В связи с проблемой оценки максимальных возможностей солнечного ускорителя (ускорителей) большой интерес представляет распределение событий GLEs по их абсолютной интенсивности. Не менее интересен и важен вопрос о протонной светимости Солнца в сравнении с другими звёздами. В более широком, астрофизическом контексте речь идёт о сравнении энергетики солнечных вспышек и вспышек на других звёздах.



**Рис. 16.** (В цвете онлайн.) Осцилляции частоты регистрации GLEs [139]. (а) Временная серия PWM для частоты регистрации была построена методом Морле по датам для 70 событий за период 1942–2006 гг. (б) Вейвлет-диаграмма для спектра осцилляций (их периоды указаны слева в долях года вдоль оси ординат). (в) Спектр плотности мощности осцилляций в произвольных единицах (ось абсцисс) в зависимости от периода в долях года (ось ординат). Штриховая линия соответствует уровню красного шума.

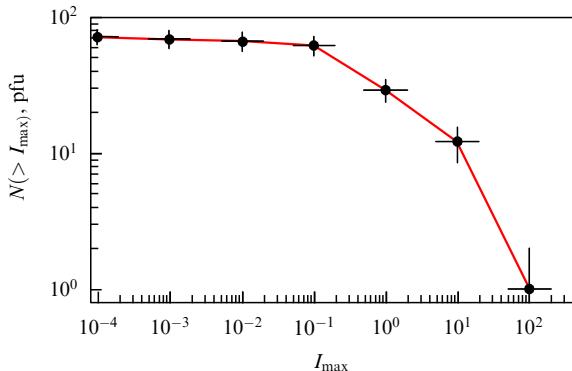


Рис. 17. Интегральное распределение 71 GLEs за период 1942–2014 гг. по величине потока СКЛ (в единицах pfu) при жёсткости частиц  $R > 1$  ГВ [135].

### 6.1. Распределение GLEs

Недавно в работе [135] была предпринята попытка построить интегральное распределение GLEs по их абсолютным потокам при жёсткости протонов  $R > 1$  ГВ. Для этой цели были собраны по литературе все существующие оценки  $I_{\max}(> 1$  ГВ) в единицах pfu для 71 события. Некоторые оценки были сделаны заново авторами [135]. Полученная функция распределения приведена на рис. 17.

Следует отметить, что оценки величины  $I_{\max}(> 1$  ГВ) были получены с точностью до множителя около 2,0. Один из примечательных результатов работы [135] состоит в том, что большинство значений  $I_{\max}(> 1$  ГВ) для СКЛ оказалось выше, чем интегральная интенсивность ГКЛ при том же значении жёсткости, т.е.  $I_{\text{GCR}}(> 1$  ГВ)  $\geq 1$  pfu, как это и было получено ранее [142].

С другой стороны, рис. 17 демонстрирует почти плоское интегральное распределение GLEs в области малых интенсивностей. Это ещё раз подчёркивает важность изучения GLEs малой амплитуды ("hidden GLEs") для лучшего понимания формирования спектра СКЛ, особенно в области релятивистских энергий (см., например, [63]).

### 6.2. Вспышки на звёздах, подобных Солнцу

Новые и весьма интересные аспекты проблемы СКЛ возникли совсем недавно в связи с новыми данными о супервспышках на других звёздах класса G, подобных Солнцу [143, 144]. Как известно, Солнце имеет абсолютную звёздную светимость с магнитудой +4,83 и принадлежит к спектральному классу G2V (это звезда с сильными металлическими линиями поглощения в спектре). Класс G2 означает, что звезда имеет температуру поверхности (фотосферы)  $\approx 5780$  К (жёлтый карлик). Солнцеподобными считаются звёзды с медленным вращением, у которых температура поверхности близка к солнечной (5600–6000 К), а период вращения больше 10 дней.

Недавно авторы [143] обнаружили 365 супервспышек на солнцеподобных звёздах. Данные были получены по наблюдениям на КА Kepler. Эти наблюдения указывают на то, что супервспышки связаны с гораздо большими звёздными пятнами, чем появляются на Солнце, и случаются намного чаще на быстро вращающихся звёздах. Среди 365 вспышек авторы [143] выделили 14 супервспышек на звёздах, подобных Солнцу (это медленно вращающиеся звёзды главной последовательности типа

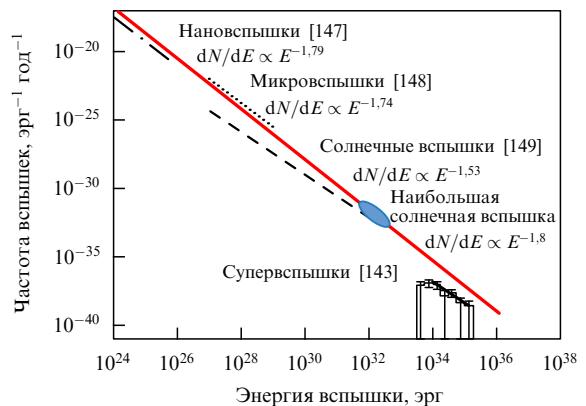


Рис. 18. (В цвете онлайн.) Частота супервспышек на звёздах типа G (гистограмма внизу) [144] в сравнении с частотой солнечных вспышек. Сплошной жирной линией на гистограмме показано дифференциальное распределение частоты супервспышек на звёздах, подобных Солнцу, с показателем  $1,5 \pm 0,3$ . Штриховая, пунктирная и штрихпунктирная линии — степенные распределения солнечных вспышек в крайней ультрафиолетовой области [147], в областях мягкого [148] и жёсткого [149] рентгеновского излучения соответственно. Жирная красная линия соответствует теоретически ожидаемой степенной функции [147] с показателем 1,8; голубой овал — наиболее мощная солнечная вспышка.

G, которые имеют период вращения более 10 земных суток и эффективную температуру поверхности в пределах  $5600 \text{ K} < T_{\text{eff}} < 6000 \text{ K}$ ). На основе этих данных была оценена частота супервспышек различной энергии. Так, при энергии  $\sim 10^{34}$  эрг одна такая вспышка может происходить один раз за 800 лет, а при энергии  $\sim 10^{35}$  эрг — один раз за 5000 лет. Простые вычисления [144] в комбинации с результатами анализа [143] показывают, что при нынешнем уровне солнечной активности супервспышки с энергией  $\sim 10^{34}$  эрг могут случаться на Солнце один раз за 800 лет. Напомним, что энергия наблюдавшихся до сих пор солнечных вспышек составляет в 100 раз меньшую величину.

В дополнение к этим оценкам следует отметить, что дифференциальное распределение супервспышек по энергиям имеет степенную форму с показателем  $\alpha_G = -1,5 \pm 0,3$  [144], близким к показателю распределения солнечных вспышек  $\alpha_S = 1,8$  (рис. 18). Более того, как показано в работе [145], показатель для пиков потоков мягкого рентгеновского излучения  $\alpha_X = 1,98 \pm 0,11$  остаётся неизменным (инвариантным) в течение трёх солнечных циклов. Фактически только этот вид солнечной (вспышечной) активности удается убедительно объяснить теоретически: значение  $\alpha_X$  согласуется с предсказанной величиной показателя  $\alpha_F = 2,0$ , вытекающей из модели [146] фрактально-диффузационной самоорганизованной критичности (FD-SOC) для солнечной плазмы.

Интересно отметить, что супервспышки на звёздах, подобных Солнцу, солнечные вспышки, микровспышки и нановспышки располагаются приблизительно (грубо) вблизи одной и той же линии, соответствующей степенному закону с показателем 1,8 (жирная красная линия на рис. 18) для широкой области энергий от  $10^{24}$  до  $10^{35}$  эрг.

### 7. Экстремальные ("древние") события СКЛ

Область исследований событий СКЛ, случившихся до начала инструментальных наблюдений, иногда назы-

вают "археологией" космических лучей. Этот термин впервые был введён авторами [150]. Его смысл состоит в том, что вместо данных прямых измерений частиц предлагается использовать косвенные данные-заменители (*proxy data*) от возможных "свидетелей-очевидцев" прошлого. Иными словами, надо научиться извлекать информацию из таких природных "архивов", где данные о прошлых явлениях не только были зарегистрированы, но и сохранились в своём первозданном виде [19]. Такими "свидетелями" являются, прежде всего, космогенные радиоактивные изотопы (радионуклиды) — радиоуглерод  $^{14}\text{C}$ , а также  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{26}\text{Al}$  и другие. Они образуются в веществе Луны и планет, в метеоритах и космической пыли, в земной атмосфере и океанах, а также на поверхности Земли под действием космических лучей. Свой вклад в образование таких изотопов вносят солнечные космические лучи.

К настоящему времени наиболее детальные данные о вариациях космических лучей в прошлом получены при изучении содержания радиоуглерода  $^{14}\text{C}$  (*радиоуглеродный метод*) в органических остатках (кольца деревьев, гумус) и изотопа бериллия  $^{10}\text{Be}$  (полярные льды, отложения на дне озёр и океанов). С конца 1940-х годов этот метод широко используется в различных областях, от археологии до физики космоса. В качестве поучительного примера сошлёмся на работы [151, 152], где было обнаружено увеличение содержания  $^{14}\text{C}$  в кольцах деревьев в 1943 г. и сделан вывод о возможной связи этого эффекта с двумя самыми первыми GLEs 28 февраля и 7 марта 1942 г. (см. рис. 2).

Другим важным "свидетелем" прошлых событий в системе Солнце–Земля являются окислы азота  $\text{NO}_x$ , точнее, некоторые конечные продукты азотного цикла в атмосфере (*нитраты, нитратный метод*). К окислам относят двойные соединения азота с кислородом — от  $\text{NO}$  до  $\text{N}_2\text{O}_5$  — или смесь из нескольких подобных составляющих. Образуясь в атмосфере Земли под действием космических лучей (ГКЛ и СКЛ), окислы азота вместе с осадками (дождём и снегом) попадают на поверхность Земли и буквально "замораживаются" во льдах Гренландии и Антарктиды. По их содержанию в кернах льда уверенно обнаруживаются "нитратные сигналы" (т.е. увеличения концентрации  $\text{NO}_x$ ), которые можно связать с приходом дополнительного потока космических лучей в земную атмосферу. Именно так были обнаружены и затем детально исследованы эффекты от отдельных мощных солнечных вспышек (см., например, [153–155]). В настоящее время их принято называть "экстремальными" протонными событиями.

## 7.1. Концепция экстремального события СКЛ

Существуют два различных подхода к определению "экстремального события" в солнечных космических лучах (см., например, [20]). Первый из них предлагает считать событие экстремальным, если наземная сеть станций КЛ зафиксировала приход к Земле заметного потока релятивистских солнечных протонов (GLE). Альтернативное определение сводится к тому, что основной поток СКЛ на орбите Земли регистрируется в основном в нерелятивистской области. Напомним, что на шкале энергий спектр СКЛ перекрывает несколько порядков величины потока, причём релятивистские частицы представляют собой только часть общего спектра SEPs. Поэтому использование названия SEPs

(наряду с термином СКЛ) представляется вполне оправданным, а термин SEP events (или СПС) является даже более общим для описания ускоренных частиц солнечного происхождения.

С другой стороны, при оценках радиационной опасности на околоземных и межпланетных трассах принято рассматривать обычно солнечные протоны с энергией  $\sim 10$ – $100$  МэВ как "наиболее эффективные" для формирования дозы радиации. Типичное значение эффективной энергии составляет 30 МэВ (для протонов), причём для расчётов доз важен не поток, а интегральный флюенс  $\Phi (\geq 30 \text{ МэВ})$  в единицах протон/ $\text{см}^2$ . Поэтому экстремальным можно считать только событие, в котором величина  $\Phi (\geq 30 \text{ МэВ})$  превысила некоторое выбранное значение. Иными словами, речь идёт о заведомо мощных СПС. При таком подходе событие с *самым большим* флюенсом  $\Phi (\geq 30 \text{ МэВ})$  из всех выбранных наблюдавшихся событий можно считать экстремальным. В практическом плане такое событие служит примером "наихудшего случая" для оценок радиационной опасности в космосе и расчёта некоторых геофизических эффектов СКЛ.

Вплоть до последнего времени эталоном "наихудшего случая" считалось так называемое событие Кэррингтона (СК), зарегистрированное 1–2 сентября 1989 г. Наблюдения солнечной вспышки 1 сентября 1989 г. послужили инструментальным началом физики солнечных вспышек, а последовавшие за ней геофизические возмущения (полярные сияния, большая магнитная буря и другие явления) подтвердили экстремальный характер всего события. Интегральный флюенс СК  $\Phi (\geq 30 \text{ МэВ}) = 1,88 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$  превзошёл флюенсы всех других событий, обнаруженных [155] нитратным методом при изучении содержания окислов азота в колонках гренландского льда за период 1561–1950 гг. Поэтому СК было признано "наихудшим случаем" в указанном выше смысле (см., например, [156, 157]). Действительно, два ближайших кандидата на роль "наихудшего случая" — события 15 ноября 1960 г. и 4 августа 1972 г. — характеризовались гораздо меньшими флюенсами  $\Phi (\geq 30 \text{ МэВ})$ , около  $9 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$  и  $5 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$  соответственно [158].

## 7.2. Наибольшие события СКЛ в прошлом

Одна из наших предыдущих работ [157] была сильно мотивирована публикацией новых данных о флюенсах протонов для ряда больших событий 1561–1994 гг., часть из которых была идентифицирована нитратным методом [155]. Полный список [155] включает 12 больших событий за период 1561–1950 гг., с флюенсом  $\Phi (\geq 30 \text{ МэВ}) \geq 6 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$ . Все оценки получены при изучении керна гренландского льда:  $7,1 \times 10^9$  (1605);  $8,0 \times 10^9$  (1619);  $6,1 \times 10^9$  (1637);  $7,4 \times 10^9$  (1719);  $6,3 \times 10^9$  (1727);  $6,4 \times 10^9$  (1813);  $9,3 \times 10^9$  (1851);  $1,88 \times 10^{10}$  (1859, СК);  $7,0 \times 10^9$  (1864);  $7,7 \times 10^9$  (1894);  $1,11 \times 10^{10}$  (1895);  $8,0 \times 10^9$  (1896).

Эти данные подвергались анализу и интерпретации, в частности, в работах [156, 158]. В дальнейшем среди исследователей появились определённые сомнения [159, 160] относительно достоверности самого "нитратного сигнала" для события Кэррингтона и, соответственно, относительно надёжности оценок флюенса  $\Phi (\geq 30 \text{ МэВ})$  авторами [155]. Эти сомнения, по нашему мнению, не лишены оснований, но они не закрывают возможность использования данных о СК (наряду с другими собы-

тиями из списка [155]) для построения современной функции распределения СПС по флюенсам  $\Phi(\geq 30 \text{ МэВ})$  (см. раздел 7.3). Такой подход, на наш взгляд, поможет также разрешить сомнения [159, 160].

Спустя около 10 лет после фундаментальной работы [155] авторами [161] был опубликован новый список из 23 мощных "древних" СПС с флюенсами  $\Phi(\geq 30 \text{ МэВ}) \geq 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , которые могли случиться в прошлом на шкале времени  $\sim 100\text{--}1000$  лет. Значения  $\Phi(\geq 30 \text{ МэВ})$  оценивались по "археологическим" данным о космогенных изотопах  $^{14}\text{C}$  и  $^{10}\text{Be}$ . При этом предполагалось, что событие-кандидат развивалось по так называемому "сценарию GLE05", т.е. по сценарию известного события 23 февраля 1956 г., которое до сих пор считается *самым большим* по потоку и флюенсу частиц в области релятивистских энергий. Заметим, однако, что "сценарий GLE05" уязвим для критики — прежде всего потому, что спектр нерелятивистских протонов 23 февраля 1956 г. был довольно пологим (см., например, [17]), а флюенс  $\Phi(\geq 30 \text{ МэВ})$  достигал всего  $\sim 10^9 \text{ см}^{-2}$  [150]. Вместе с тем, все события из списка [161] заслуживают самого тщательного дальнейшего изучения.

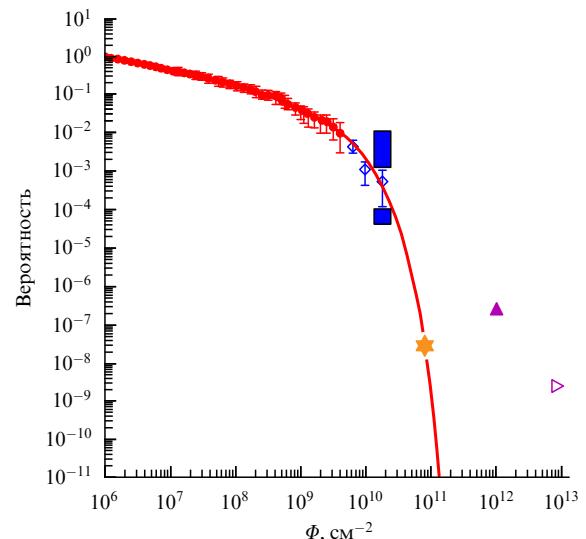
Несколько лет назад радиоуглеродным методом ( $^{14}\text{C}$ ) были обнаружены определённые признаки возрастания интенсивности КЛ около 774–775 гг. нашей эры (ниже это событие для краткости обозначено как AD775). Данные были получены по содержанию  $^{14}\text{C}$  в кольцах старых деревьев в Японии, Европе, России и Америке, причём почти одновременно тремя независимыми группами исследователей [162–164]. В настоящее время наибольшие значения флюенса  $\Phi(\geq 30 \text{ МэВ})$ , полученные по этим данным, составляют от  $(2,07\text{--}2,96) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$  [157] до  $4,5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$  [163] и  $8,0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$  [167]. Как бы то ни было, представляется очевидным, что теперь на роль "наихудшего случая" может претендовать событие AD775. Несмотря на некоторые сомнения и споры о надёжности оценок  $\Phi(\geq 30 \text{ МэВ})$  и даже о природе (источнике) самого события AD775 ([157, 165–168]), в разделе 7.3 мы используем все имеющиеся оценки, чтобы построить новую функцию распределения СПС по интегральным флюенсам  $\Phi(\geq 30 \text{ МэВ})$  [157] в максимально доступном диапазоне значений флюенса.

### 7.3. Новая функция распределения

Чтобы аппроксимировать данные о флюенсах, мы использовали следующую функцию (рис. 19):

$$\Psi(\geq \Phi) = \left( \frac{\Phi}{10^6} \right)^{-\gamma} \left( \exp \frac{\Phi}{\Phi_0} \right)^{-1}, \quad (7)$$

где  $\gamma$  — показатель степени,  $\Phi \equiv \Phi(\geq 30 \text{ МэВ})$ ,  $\Phi_0$  — характеристическая постоянная экспоненциального множителя. Такая форма для функции распределения, по-видимому, является универсальной для описания многих проявлений солнечных вспышек (например, пиковых потоков или флюенсов во всплесках рентгеновского и радиоизлучения, в протонной и электронной эмиссии и т.п.). Сплошная линия на рис. 19 соответствует формуле (7); вертикальными отрезками показаны пределы ошибок (стандартные среднеквадратичные отклонения). Синий прямоугольник характеризует неопределенность в оценках флюенса для события AD775. Аппроксимация функции распределения по флюенсам с помощью соотношения (7) представляется разумной при следующих параметрах:  $\gamma = 0,32$ ;  $\Phi_0 = 7 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$ .



**Рис. 19.** (В цвете онлайн.) Функция распределения СПС по интегральным флюенсам протонов  $\Phi \equiv \Phi(\geq 30 \text{ МэВ})$  с учётом последних данных о "древних" экстремальных событиях. Красные точки — данные прямых спутниковых измерений ("космическая эра"); голубые ромбы — оценки, полученные нитратным методом [155], включая событие Кэррингтона. Синий прямоугольник соответствует событию AD775 с учётом новейших оценок (см. Дополнение при корректуре). Лиловыми треугольниками справа (тёмный и светлый) обозначены интегральные флюенсы  $\Phi(\geq 30 \text{ МэВ})$  при экстраполяции в прошлое на 1 млн лет и 100 млн лет соответственно (оценено в [157] по данным [169]); оранжевая звёздочка — оценка максимального флюенса  $\Phi(\geq 30 \text{ МэВ})$  по содержанию космогенных изотопов в лунных породах (см. Дополнение при корректуре).

Таким образом, появление принципиально новых архивных данных о "древних" протонных событиях позволяет существенно продвинуться в практической важной проблеме — оценке вероятности появления у Земли "экстремальных" потоков СКЛ (по крайней мере, при среднем уровне СА в современную эпоху). Комбинация модели (7) с моделью предельного спектра СКЛ (ULS, см. раздел 3.4) позволяет также развить новый подход к концепции "наихудшего случая", причём событие Кэррингтона и событие AD775 обеспечивают решающие точки для соответствующей нормировки. Такая перспектива представляется весьма многообещающей для моделирования и расчётов радиационных доз.

### 8. Геофизические и прикладные аспекты

Благодаря своему ионизирующему действию SEPs — солнечные частицы с энергиями порядка десятков и сотен МэВ — играют существенную роль во многих геофизических процессах (см., например, [17, 19, 20, 138, 170]). Среди них наиболее известны эффекты опустошения озона в атмосфере, возмущения в глобальной цепи атмосферного электричества, изменение прозрачности земной атмосферы, генерация нитратов и космогенных изотопов и ряд других, менее изученных или пока предполагаемых (твёрдо не доказанных) явлений. Мы кратко рассмотрим вклад в эти эффекты от релятивистских солнечных протонов. Заметим, что плотность энергии и общая энергия, вносимая СКЛ в атмосферу Земли, не сравнима с другими поступлениями энергии от Солнца в околосземное пространство. По этой причине СКЛ не являются основной причиной геофизических

возмущений (по сравнению, например, с СМЕ и геомагнитной бурей). Однако, в силу своей спорадической природы, приход SEP может быть важной ("триггерной") составляющей глобального механизма солнечно-земных связей. В разделах 8.1, 8.2 мы приведём только два характерных примера эффектов СКЛ в земной атмосфере, а затем кратко рассмотрим попытки использовать данные наземных наблюдений для прогноза потоков СКЛ.

### 8.1. Атмосферные эффекты СКЛ во время GLE

Проникновение SEP в полярную атмосферу должно неизбежно модифицировать состав и физико-химические процессы в мезосфере и стратосфере [171, 172]. Авторы [171] рассмотрели воздействие SEP на указанные процессы для трёх GLEs, зарегистрированных в октябре 1989 г., июле 2000 г. и апреле 2001 г., в широком диапазоне энергий и с учётом временной эволюции их спектров. Изучались процессы генерации окислов азота  $\text{NO}_x$  и водорода  $\text{HO}_x$ , а также изменения содержания озона  $\text{O}_3$ , проведено сравнение результатов расчётов для различных событий. Анализ проводился на основе модели, где учитывалось проникновение (осаждение) частиц в атмосферу и последующая модификация химии атмосферы.

В октябре 1989 г. (рис. 20) сначала отмечался высокий уровень ионизации в нижней стратосфере, тогда как ионизация в мезосфере была на порядок меньше. Со временем уровень ионизации в нижней стратосфере не менялся (поскольку интенсивность частиц высокой энергии оставалась почти постоянной), а в мезосфере ионизация существенно усилилась за счёт прихода частиц малой энергии, интенсивность которых продолжала расти. Картинка вариаций ионизации в июле 2000 г. выглядит более сложной по сравнению с октябрём 1989 г.: в то время как ионизация средней мезосферы была высокой, в верхней мезосфере её уровень оказался ниже. Поскольку интенсивность частиц высокой энергии начинает уменьшаться довольно рано, скорости ионизации в стратосфере также снижаются по мере эволюции события. Лишь в верхней мезосфере скорости ионизации возрастают со временем. В апреле 2001 г. расчётные профили ионизации сравнимы по форме с профилями

ионизации для события в октябре 1989 г., хотя абсолютные значения скоростей ионизации оказываются почти в 2–3 раза меньше. Тем не менее уровень ионизации с течением времени уменьшается на всех высотах. Модель даёт одинаковые результаты при экстраполяции спектров протонов до 500 МэВ или даже до 800 МэВ.

Исследования в том же направлении были проведены [172] для GLE70 (13 декабря 2006 г.). Изучался эффект воздействия энергичных солнечных протонов на химический состав средней атмосферы (20–80 км). Спектры протонов были получены по данным НМ, по измерениям в стратосфере и на космических аппаратах. Для расчётов генерации и потерь содержания малых составляющих атмосферы во время GLE использовалась одномерная модель, разработанная авторами ранее, с учётом её зависимости от времени. Полученные оценки скорости опустошения озонного слоя оказались в хорошем согласии с данными измерений детектора Micro-wave Limb Sounder (MLS) на борту КА AURA. По мнению авторов, главным фактором, вызывающим уменьшение содержания озона в средней атмосфере во время осаждения солнечных протонов, является генерация нечётных составляющих  $\text{HO}_x$  с последующей рекомбинацией продуктов ионизации.

### 8.2. Генерация космогенных изотопов

Здесь мы рассмотрим известный эффект генерации космогенных изотопов космическими лучами в земной атмосфере на примере одной из последних работ в этой области [173]. Авторы выполнили детальные новые расчёты скорости (мощности) генерации космогенных изотопов  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$  и  $^{36}\text{Cl}$ , пользуясь программным обеспечением FLUKA (Monte Carlo code) с учётом последних данных о сечениях взаимодействия для вертикально падающих протонов с энергиями от 10 МэВ до 10 ГэВ. Это позволило исследовать генерацию изотопов за счёт как СКЛ, так и ГКЛ в области малых энергий, где мощность генерации является очень чувствительной функцией энергии. На примере событий в октябре–ноябре 2003 г. показано, что скорость генерации  $^{10}\text{Be}$  в этих событиях достигла максимума при энергии  $\sim 100$  МэВ, тогда как изотопы  $^7\text{Be}$  и  $^{36}\text{Cl}$  более интенсивно генерировались при энергии  $\sim 25$  МэВ с "резонансным" сечением процесса. Если использовать более крутой спектр СКЛ, чем наблюдавшийся в октябре–ноябре 2003 г., то максимум мощности генерации сдвигается в сторону меньших энергий, тогда как в случае более плоского спектра (как в событии 20 января 2005 г.) пик генерации будет сдвигаться к более высоким энергиям. Отметим, что для событий 2003 г. полная интегральная генерация изотопов  $^7\text{Be}$  и  $^{36}\text{Cl}$  за счёт СКЛ будет примерно в 3 раза выше, чем генерация изотопа  $^{10}\text{Be}$ . Это объясняется эффектом "резонанса", наступающим при энергии протонов  $\sim 25$  МэВ, которые и генерируют изотопы  $^7\text{Be}$  и  $^{36}\text{Cl}$  путём расщепления ядер атмосферного азота  $^{14}\text{N}$  и атмосферного аргона  $^{40}\text{Ar}$  соответственно.

Если анализировать годичную генерацию изотопа  $^{10}\text{Be}$ , то видно, что только экстремальное событие 23 февраля 1956 г. могло дать значительный вклад. Для изотопа  $^{36}\text{Cl}$  годовые значения генерации примерно в 2–5 раз выше, в зависимости от вида спектра СКЛ. Авторы [173] провели расчёты годовых значений генерации  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  и других изотопов на геомагнитной широте  $> 65^\circ$

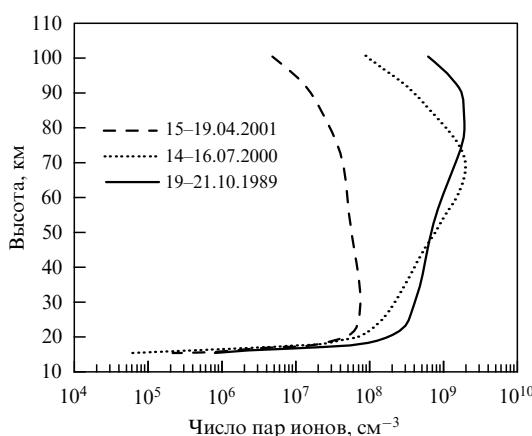


Рис. 20. Сравнение высотных профилей ионизации в атмосфере Земли во время трёх GLEs с учётом вклада солнечных протонов с энергией вплоть до 500 МэВ [171].

для периода 1940–2006 гг., который перекрывает шесть 11-летних солнечных циклов. Средняя амплитуда 11-летней вариации годичных значений содержания этих изотопов составляет приблизительно 1,77. Если учесть широтное перемешивание, то эта амплитуда уменьшится до 1,48 для средней глобальной генерации.

### 8.3. СКЛ в прогностических схемах

Среди многочисленных методик и схем гелио-геофизического прогнозирования в середине 1980-х годов начала рассматриваться идея использовать наземные наблюдения КЛ для целей краткосрочного прогноза различных явлений. В частности, было выдвинуто несколько интересных предложений использовать релятивистские солнечные протоны ( $R \geq 1$  ГВ) в качестве предиктора СПС в нерелятивистской области. Так, авторы [174] впервые рассмотрели возможность диагностики межпланетной среды и прогноза начала СПС на основе решения обратной задачи переноса СКЛ. По данным наблюдений GLE до максимума СКЛ на орбите Земли предполагалось сначала восстановить функцию их испускания на Солнце, а затем предсказать ход развития СПС на несколько часов вперёд.

Хотя методические аспекты такого подхода были достаточно обоснованы, оставалось неясным, каким способом предложенную схему можно проверить по данным наблюдений. Одна из сложностей состояла в том, что большой поток релятивистских протонов не всегда сопровождался таким же увеличением потока в нерелятивистской области (см. рис. 8), т.е. возникнал трудный вопрос о форме спектра СКЛ в источнике. Впоследствии роль релятивистских СКЛ в прогностических схемах рассматривали многие авторы [175–180]. Так, в работе [175] был развит эмпирический подход к определению спектра солнечных протонов вблизи Земли в диапазоне энергий 10 МэВ–10 ГэВ непосредственно по данным наблюдений, без каких-либо предварительных предложений о возможной форме спектра. Предложенная методика позволяла также реконструировать временной профиль интенсивности для протонов любой энергии. Интересная схема алертов для прихода СКЛ и автоматического определения их спектра была предложена в работе [176] на основе 1-минутных данных мировой сети НМ (база NMDB).

Авторы [177] предприняли попытку прогнозировать вид спектра максимальных потоков для нерелятивистских протонов во время СПС по данным о спектре мягкой компоненты (МК) в соответствующем GLE. При этом спектр в области  $\leq 500$  МэВ рассматривается как естественное плавное продолжение спектра МК. На примере события GLE47 (21 мая 1990 г.) было показано хорошее согласие между спектром МК и его экстраполяцией в область низких энергий ( $\leq 433$  МэВ), где проводились прямые измерения на КА Метеор и стратосферные измерения на шарах-зондах. Авторами предложена разумно ограниченная расчётная модель, в которой используются данные почти 20 нейтронных мониторов. Она позволяет с достаточной для оперативного прогноза точностью получать спектры СКЛ в реальном времени и в автоматическом режиме решать ряд задач космической погоды.

Однако дальнейшие исследования показали, что описанные выше схемы носят пока пробный характер и не могут претендовать на исчерпывающее решение про-

блемы. Так, авторы [178] проверили результаты применения метода [179], который был разработан для раннего оповещения о приходе к Земле солнечных протонов с  $E_p \sim 10-100$  МэВ на базе NMDB. Ретроспективный анализ и сравнение с наблюдениями за 2001–2006 гг. показали, что более 50 % солнечных протонных событий при таком способе прогноза были пропущены. Для повышения надёжности данного метода необходимо использовать дополнительные сведения о состоянии солнечной и гелиосферной активности.

Новый подход к проблеме прогнозирования GLE был предложен в [180], где авторы использовали особенности вариаций частоты регистрации GLE (см., например, [139] и рис. 16). Ближайшей целью авторов [180] было разработать методику прогноза таких событий на период 24-го цикла СА. Пробный прогноз указывал, что очередного GLE71 следовало ожидать между 12 декабря 2011 г. и 2 февраля 2012 г. Фактически событие GLE71 произошло 17 мая 2012 г. Оно оказалось небольшим и наблюдалось лишь на высоких широтах (см. рис. 4). Максимальное возрастание ( $\sim 23\%$  по 5-минутным данным НМ) было зафиксировано на станции Южный полюс. Дальнейшее развитие этой идеи авторами [181], предпринятое на основе вейвлет-анализа частоты событий GLEs (см. выше раздел 5.3) и так называемых "инструментов нечёткой логики" ("fuzzy logic tools"), оказалось, однако, несколько разочаровывающим. Так, например, авторы [181] предсказывали, что следующее GLE (после GLE71) случится в первом полугодии 2015 г., но реальное событие GLE72 произошло только 10 сентября 2017 г.

Практически важные аспекты космической погоды в связи с повышенной частотой GLE в 23-м цикле СА были детально рассмотрены в работе [182]. В этой работе были представлены результаты расчётов дозы радиации для самолётов на полярных трассах для каждого из событий GLEs прошлого цикла. Особый интерес представляют эффекты космической погоды во время больших солнечных событий в октябре и ноябре 2003 г. Авторы подчёркивают важность усилий по использованию данных НМ для прогноза СПС в области наиболее радиационно-опасных энергий СКЛ (десятка и сотни МэВ). Такой прогноз обеспечивает возможность заблаговременно предупредить экипажи самолётов и космических кораблей о предстоящей угрозе облучения. С другой стороны, недавно по методикам пяти разных исследовательских групп (Апатиты, Афины, Берн, Киль, Хобарт) для трёх реальных авиатрасс были проведены расчёты радиационных доз [183] от двух GLEs (15 апреля 2001 г. и 20 января 2005 г.). Расхождения в оценках доз по различным методикам оказались удручающе большими. Это определённо указывает на наличие существенных методических проблем при анализе и использовании данных НМ. Оценки расходятся в основном из-за неточного определения и учёта формы спектра СКЛ на орбите Земли в различные моменты протонного события.

В последние годы для разработки прогностических схем исследователи стали всё чаще обращаться к потокам (флюенсам) протонов с энергиями  $\geq 100$  МэВ [178] и  $\geq 200$  МэВ [184]. Используются также отношения флюенсов  $\Phi(\geq 30 \text{ МэВ})/\Phi(\geq 200 \text{ МэВ})$  (см., например, [184]). Заметим, что такой анализ проводится "внутри" уже сформированного у Земли спектра СКЛ для данного события, поэтому его результаты, на наш взгляд, не могут претендовать на серьёзные прогностические реко-

мендации. Вместе с тем, подобный анализ важен для понимания природы "изломов" в спектре СКЛ (см., например, [157]).

## 9. Подводя итоги...

Изложенное выше позволяет подвести некоторые итоги, перечислить возникающие вопросы и отметить ряд нерешённых проблем в изучении СКЛ.

### 9.1. Возникающие вопросы и/или нерешённые проблемы

Один из актуальных вопросов физики GLE был поставлен в специальном выпуске журнала *Space Science Reviews* [vol. 171, 2012]: какими должны быть особые условия на Солнце для генерации GLE? Автор [113] склоняется к выводу, что БК в событиях GLE может иметь вспышечное происхождение в нижней короне, тогда как задержанная МК может быть генерирована двумя путями: длительным ускорением и/или захватом частиц в области вспышки либо ускорением на корональной и межпланетной ударных волнах. С другой стороны, в [114] отмечается, что пока не удалось найти отчётливой корреляции между амплитудой GLE и параметрами вспышек или CMEs.

Тем не менее имеются веские аргументы в пользу гипотезы, что перед началом GLE, как раз перед вы свобождением частиц, в короне формируется ударная волна. Высвобождение частиц происходит в момент, когда CMEs достигают высоты в среднем  $\sim 3,09 R_{\odot}$ , по крайней мере, для магнитно-сопряжённых источников на Солнце (W20 – W90). Используя модель потенциального поля на поверхности источника (PFSS), авторы [185] указывают, что только около половины всех GLEs являются хорошо магнитно-сопряжёнными с источниками. В то же время ни мощность CMEs и вспышек, ни степень сложности активных областей на Солнце не обеспечивают достаточных условий для возникновения GLEs. Как показано в [186], мощное событие 20 января 2005 г. (GLE69) могло иметь два источника — вспышку и сопутствующий CME.

Очень интересную особенность GLE отмечают авторы [187]: в интервале энергий 45–80 МэВ/нуклон около 50 % событий GLE имеют общие свойства с импульсными СПС, обогащёнными  $^3\text{He}$ , включая обогащение другими ионами (повышенные отношения  $\text{Ne}/\text{O}$ ,  $\text{Fe}/\text{O}$ ,  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ ) и высокое зарядовое состояние ионов Fe. Предполагается, что такие события вносят вклад в затравочную популяцию частиц, которые в дальнейшем ускоряются на ударных волнах, инициированных CMEs. В [188] предлагается сценарий генерации GLE, в котором происходит взаимодействие двух CMEs при условии, что они были последовательно выброшены из короны над одной и той же активной областью. Первый CME предполагается более узким и медленным по сравнению со вторым. Когда второй CME догоняет первый, возникает процесс пересоединения их магнитных структур. Тем самым эффект ускорения на ударных волнах от комбинации двух CMEs будет усиливаться.

Таким образом, единственный вывод, с которым, видимо, могут согласиться все исследователи GLEs, уже был сформулирован несколько лет назад [26]: мы имеем дело с интенсивно развивающейся концепцией GLE ("еволюционирующей парадигмой").

Детальная физическая картина процессов, приводящих к двухпиковой структуре GLE, до конца не ясна. Мы склонны считать, что гипотеза о "межпланетном проис-

хождении" двух компонент не может полностью разрешить проблему. Есть также достаточно веские основания для того, чтобы в качестве основной модели генерации СКЛ принять модель с двумя источниками на Солнце. Такой подход, очевидно, не противоречит, а скорее подтверждает современную концепцию многократного ускорения частиц на Солнце.

### 9.2. Перспективы изучения СКЛ

Перспективы этого направления солнечно-земной физики вытекают из самого факта, что за 75 лет изучения СКЛ многие фундаментальные вопросы физики ускорения частиц (как на микро-, так и на макроуровнях) остаются нерешёнными. В перечень таких вопросов можно включить длительность и мощность инжеクции ускоренных частиц, относительную роль ускорения и захвата (удержания) частиц (длительные события). Требуют дальнейшего изучения вариации элементного состава и зарядового состояния ускоренных частиц от события к событию.

Область исследования СКЛ и приложения полученных результатов далеко не ограничивается сказанным выше. Например, вопросы, связанные с генерацией нейтронов и гамма-излучения солнечных вспышек (см., например, [15, 189–193]), непосредственно касаются физики ускорения, локализации источников СКЛ на Солнце и т.п. Однако они выходят далеко за рамки данного обзора. Для примера отметим только нерешённую проблему источника гамма-излучения в линии 2,223 МэВ в событии GLE42 [35, 194]. Как отмечено выше, очень важны также исследования слабых событий СКЛ по наземным данным. Для примера упомянем небольшое GLE54 (2 ноября 1992 г.), отмеченное на НМ станции Мехико с высоким геомагнитным порогом (жёсткость обрезания около 7,5 ГэВ) [195].

Пожалуй, самым большим вызовом для исследователей остаются те GLEs, которые сопровождались длительным (до 2 ч) гамма-излучением высокой энергии (до 2 ГэВ). Примерами таких событий могут служить GLE51 и GLE52, зарегистрированные 11 и 15 июня 1991 г. соответственно [196, 197]. В свете нашего предыдущего рассмотрения длительное ускорение СКЛ и/или их длительное удержание (испускание) представляются маловероятными. Однако нельзя исключить возможность постэруптивного ускорения, по крайней мере, в два этапа (см., например, [198, 199]). Такой подход приближает нас к новой концепции GLE (см. раздел 4) и не противоречит другой, более общей концепции — существованию процессов множественного ускорения частиц в солнечных условиях [93]. Заметим, однако, что данные о нейтронах и гамма-излучении свидетельствуют о том, что ускорение частиц до релятивистских энергий происходит, скорее, во вспышках, а не на фронтах ударных волн, сопровождающих CME.

К близким выводам приходят авторы ряда статистических работ последнего времени, например [200, 201]. Так, в [200] в результате анализа 44 СПС в диапазоне энергий 15–40 МэВ сделано заключение, что вспышки играют преобладающую роль в ускорении протонов до высоких энергий. Этот вывод подтверждается результатами статистического анализа [201] связи между флюенсами микроволновых всплесков на частоте 35 ГГц и флюенсами протонов с энергией  $E > 100$  МэВ. Ускорение на ударных волнах оказывается менее значимым на высоких энергиях, если события связаны с мощными вспышками, хотя его вклад, вероятно, преобладает в более слабых событиях. Отсюда следует, что традицион-

ное противопоставление ускорения частиц во вспышке и на ударных волнах должно уступить место новому, более взвешенному подходу (см. рис. 3).

Что касается известной дилеммы вспышка–СМЕ (разделы 2.3 и 4.1), то однозначный ответ здесь дать трудно, так как указанная дилемма пока не решена. Ясно только, что и то и другое — это две стороны одного явления — мощного "взрыва" в солнечной атмосфере. Здесь важно подчеркнуть, что речь идёт не о взрыве в привычном смысле этого слова, а о специфическом электродинамическом процессе в высокотемпературной плазме, которая "пропитана" сильным магнитным полем [85, 87]. Современные многоволновые наблюдения Солнца показывают, что свойства этого процесса отличаются определёнными особенностями (см., например, [87, 202]). Применительно к генерации СКЛ особый интерес представляет распределение энергии между отдельными участниками указанного процесса, в частности, доля энергии, уносимой ускоренными частицами в различных моделях ускорения.

Среди геофизических приложений представляются важными детальные исследования ряда малоизученных эффектов СКЛ в атмосфере Земли, отмеченных в работах [138, 170], с учётом современных возможностей слежения за её текущим состоянием по измерениям на космических аппаратах. При этом заслуживает внимания критика "космоклиматологии", представленная в [203], где ставится под сомнение сама возможность связи между ионизацией атмосферы космическими лучами и процессом образования аэрозолей (и в дальнейшем — облаков).

За несколько десятилетий исследований СКЛ в этой области был накоплен огромный наблюдательный материал и получены результаты фундаментального значения. Так, например, ещё до открытия синхротронного радиоизлучения релятивистских электронов от далёких галактических источников была впервые показана возможность ускорения протонов в атмосферах звёзд.

Таким образом, изучение СКЛ за истекшие несколько десятилетий позволило выявить глубокие и разносторонние связи СКЛ (их "взаимопроникновение") с проблемами звёздной физики в целом, физики космической плазмы и геофизики, с некоторыми общефизическими проблемами (например, с проблемой ускорения частиц) и т.д.

Интерес к проблеме СКЛ со временем только возрастает, в том числе в связи с глобальными вопросами эволюции Солнца как звезды, уровня его активности в прошлом, возможного вклада экстремальных солнечных вспышек в эволюцию биосфера и т.п. Таким образом, изучение СКЛ было и остаётся одним из наиболее эффективных инструментов для изучения физики Солнца и солнечно-земных связей.

В заключение следует выразить глубочайшую признательность нескольким поколениям исследователей, которые многие годы обеспечивали и продолжают поддерживать работу мировой сети станций космических лучей. Автору приятно выразить благодарность всему международному сообществу учёных, занимающихся изучением СКЛ, всем коллегам-космофизикам из многих стран, чьи материалы, идеи и результаты были использованы при подготовке данного обзора. Особого упоминания заслуживают мои коллеги по советской (российской) рабочей группе "Каталог", которая с начала 1980-х годов подготовила и опубликовала несколько каталогов СПС за период 1970–2009 гг. (более четырёх циклов солнечной активности). Автор также очень признателен независимому рецензенту за щательный разбор текста, полезные советы и ценные замечания.

## Дополнение при корректуре

**Экстремальные солнечные события: миф или реальность?** Именно так приходится обозначать фундаментальную проблему, которая в последние два десятилетия вызывает пристальный интерес многих исследователей — от теоретиков-астрофизиков (например, [204–207]) до гляциологов и климатологов [159, 160], а также специалистов по радиационной безопасности космических миссий [208]. "Цена вопроса" оказалась очень высокой. Только за последние 5 лет по этой проблеме опубликовано несколько десятков статей. Из них мы выделим, прежде всего, работы, в которых критически обсуждаются различные методологические аспекты изучения древних СПС. Особенно серьёзным сомнениям подвергается "нитратный метод".

После публикации первых косвенных данных (proxy data) о флюенсах протонов  $\Phi$  ( $\geq 30$  МэВ) [155], полученных нитратным методом, в частности, для события Кэррингтона AD1859, другим (радиоуглеродным) методом были обнаружены события AD775 [162–164], а также СПС 994AD [209, 210] и 3372 BC [211]. Хотя эти данные весьма ограничены, авторы [157] сочли возможным использовать их для построения новой функции распределения СПС (см. рис. 19) по флюенсам  $\Phi$  ( $\geq 30$  МэВ). При этом были учтены последние оценки флюенса для события AD775 [212], а также оценки предельного флюенса от СКЛ [213] для самых мощных СПС.

Публикации [155] предшествовали попытки связать импульсные нитратные пики, обнаруженные во льдах Гренландии и Антарктиды, с большими СПС (см., например, [153, 154, 158]). Было обращено внимание на то, что пики запаздывают всего на несколько недель относительно больших СПС. Такая картина наблюдалась, в частности, после первых четырёх GLEs [154]. Спустя несколько лет эти публикации вызвали острую дискуссию о надёжности нитратных данных как для идентификации древних СПС, так и для оценки флюенсов. Так, авторы [159] отрицали наличие самого "нитратного сигнала" от события AD1859: его можно было приписать осаждению пепла от лесных пожаров в Северной Америке. Этот вывод был оспорен в работе [214] на том основании, что авторы [159] опирались на данные с низким временным разрешением. Вскоре появились новые возражения [215] против аргументов [214]: при этом был сделан вывод, что использование данных о содержании  $^{10}\text{Be}$  представляется более перспективным, пусть даже и с меньшим разрешением.

Наконец, отметим обстоятельное исследование [216], в котором так называемая WACCM (обобщённая климатическая модель) применяется для детального изучения вопроса: насколько мощным должно быть СПС, чтобы генерировать по всей атмосфере количество нитратов, достаточное для обнаружения современными методами? Вывод [216] звучит как "приговор" нитратному методу: нитраты не могут служить в качестве косвенных данных (proxy data) для изучения древних СПС, а результаты, основанные на этих данных, должны быть отвергнуты. Заметим, кстати, что авторы [217], опираясь на результаты моделирования и измерений в различных кернах полярного льда, пришли к выводу, что даже при высоком временному разрешении (до 20 образцов-измерений в год) и при исключении процессов после отложения нитратов не удалось обнаружить нитратный сигнал от события AD775, хотя оно считается пока самым большим из всех известных древних СПС. Авторы [218], в свою очередь, после анализа нитратных

данных для событий AD775, 994, 1859 и 1956 годов считают, что ни в одном из них не было достаточно чёткого (измеримого) нитратного сигнала.

Это, однако, не исключает возможности использовать нитратные данные для изучения, например, многолетних вариаций ГКЛ [219]. Более того, вейвлет-анализ обнаружил высокую степень когерентности между пиками  $^{10}\text{Be}$  и содержанием нитратов. При этом предпочтительную связь между  $^{10}\text{Be}$  и нитратами (по сравнению с другими химическими составляющими атмосферы) можно приписать их общему космогенному источнику. Здесь уместно отметить многообразие источников генерации нитратов в земной атмосфере (см., например, [220]), мультидисциплинарный характер самой проблемы [221] и наличие ряда нерешённых или плохо изученных вопросов взаимодействия СКЛ с земной атмосферой (например, [138, 216, 222]).

В заключение приведём также несколько интересных замечаний из книги [223]. Одно из них констатирует простой факт: то, что для одного учёного представляет интерес как косвенные данные (proxy data), для другого является просто "шумом". Действительно, генерация космогенных составляющих атмосферы регулируется солнечной активностью и (на больших временных масштабах) напряжённостью геомагнитного поля. Однако результатирующий космогенный "сигнал" не сразу и не прямо фиксируется в природных архивах: перед этим космогенные радионуклиды подвергаются различным процессам переноса, которые модифицируют первичный сигнал. Специалист по СПС будет называть эти модификации "шумом", так как они искажают интересующий его сигнал от СКЛ. Напротив, для физика или химика, занимающегося изучением атмосферы, именно такие модификации представляют наибольший интерес, поскольку они могут привести к улучшению моделей атмосферной циркуляции (перемешивания) и, тем самым, к лучшему пониманию взаимодействия между стратосферой и тропосферой.

В итоге автору представляется преждевременным полностью "закрывать" нитратный метод в применении к древним СПС. Достаточно вспомнить, что все имеющиеся данные являются косвенными "по определению", а оценки флюенсов сильно зависят от принимаемого "сценария" события. Задача состоит в том, чтобы на примере реального большого события (типа 20 января 2005 г.) корректно учесть такие особенности СПС, как анизотропия вторжения СКЛ, их энергетический спектр, длительность события и т.д. [224]. При этом, возможно, удастся количественно оценить относительную долю СПС в суммарном нитратном сигнале.

## Список литературы

1. Lange I, Forbush S E *J. Geophys. Res.* **47** 331 (1942)
2. Simpson J A, in *Proc. of the 21st Intern. Cosmic Ray Conf., Adelaide, Australia, January 6–19, 1990* Vol. 12 (Adelaide: Adelaide Univ., 1990) p. 187
3. Elliot H, in *Progress in Cosmic Ray Physics* Vol. 1 (Eds J G Wilson, S A Wouthuysen) (Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1952) p. 455
4. Дорман Л И *Вариации космических лучей* (М.: ГИТТЛ, 1957)
5. Дорман Л И *Вариации космических лучей и исследование космоса* (М.: Изд-во АН СССР, 1963); Пер. на англ. яз.: Dorman L I *Cosmic Rays: Variations and Space Explorations* (Amsterdam: North-Holland, 1974)
6. Dorman L I *Nuovo Cimento* **8** (Suppl. 2) 391 (1958)
7. Carmichael H *Space Sci. Rev.* **1** 28 (1962)
8. Дорман Л И, Мирошниченко Л И *Солнечные космические лучи* (М.: Наука, 1968)
9. Sakurai K *Physics of Solar Cosmic Rays* (Tokyo: Univ. of Tokyo Press, 1974)
10. Pomerantz M A, Duggal S P *Rev. Geophys.* **12** 343 (1974)
11. Duggal S P *Rev. Geophys.* **17** 1021 (1979)
12. Dorman L I, Venkatesan D *Space Sci. Rev.* **64** 183 (1993)
13. Reames D V *Space Sci. Rev.* **90** 413 (1999)
14. Ryan J M, Lockwood J A, Debrunner H *Space Sci. Rev.* **93** 35 (2000)
15. Miroshnichenko L I, Perez-Peraza J A *Int. J. Mod. Phys. A* **23** 1 (2008)
16. Мирошниченко Л И, Ващенюк Э В, Перес-Пераса Х А *Геомагнетизм и аэрономия* **53** 579 (2013); Miroshnichenko L I, Vashenyuk E V, Pérez-Peraza J A *Geomagn. Aeron.* **53** 541 (2013)
17. Miroshnichenko L I *Solar Cosmic Rays* (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2001)
18. Miroshnichenko L I *Radiation Hazard in Space* (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2003)
19. Мирошниченко Л И *Физика Солнца и солнечно-земных связей* (М.: Университетская книга, 2011)
20. Miroshnichenko L I *Solar Cosmic Rays: Fundamentals and Applications* 2nd ed. (New York: Springer, 2014)
21. Мирошниченко Л И, в сб. *Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли* (Под ред. В Д Кузнецова) (М.: ИЗМИРАН, 2015) с. 285
22. Forbush S E *Phys. Rev.* **70** 771 (1946)
23. Adams N *Philos. Mag.* **7** 41 503 (1950)
24. Forbush S E, Stinchcombe T B, Schein M *Phys. Rev.* **79** 501 (1950)
25. Красильников Д Д, Кузьмин А И, Шафер Ю Г "Вариации интенсивности космических лучей" *Tr. Якутского филиала АН СССР Сер. физ.* (1) 41 (1955)
26. Cliver E W *Proc. IAU* **4** (S257) 401 (2008)
27. Chupp E L *AIP Conf. Proc.* **374** 3 (1996)
28. Hey J S *Nature* **157** 47 (1946)
29. Smart D F, Shea M A *J. Spacecraft Rockets* **26** 403 (1989)
30. Кривоносов Ю И *УФН* **170** 1021 (2000); Krivonosov Yu I *Phys. Usp.* **43** 949 (2000)
31. Губарев В *Большой архипелаг Сталина. Документальное повествование о создании ядерной бомбы, основанное на рассекреченных материалах "Атомного проекта СССР"* (М.: Молодая гвардия, 2004)
32. Hess V F *Phys. Z.* **13** 1084 (1912)
33. Дорман И В *Космические лучи* (М.: Наука, 1981)
34. Dorman I V, Dorman L I *Adv. Space Res.* **53** 1388 (2014)
35. Carmichael H "Cosmic Rays (Instruments)", in *Annals of the International Years of the Quiet Sun, IQSY* Vol. 1 (Ed. C M Minnis) (Cambridge, MA: MIT Press, 1968) p. 178
36. Крымский Г Ф и др. *ДАН СССР* **314** 824 (1990)
37. Swinson D B, Shea M A *Geophys. Res. Lett.* **17** 1073 (1990)
38. Miroshnichenko L I, De Koning C A, Perez-Enriquez R *Space Sci. Rev.* **91** 615 (2000)
39. Karpov S N, Miroshnichenko L I, Vashenyuk E V *Nuovo Cimento C* **21** 551 (1998)
40. Flückiger E O et al., in *Proc. 16th European Cosmic Ray Symp.* (Ed. J Medina) (Alcalá de Henares: Alcalá Univ. Press, 1998) p. 219
41. Мирошниченко Л И *Геомагнетизм и аэрономия* **34** 29 (1994)
42. Schindler S M, Kearney P D, in *Proc. of the 13th Intern. Conf. on Cosmic Ray, Denver, CO, USA, 17–30 August 1973* Vol. 2 (Denver, CO: Univ. of Denver, Dept. of Physics and Astronomy, 1973) p. 1554
43. Smart D F, Shea M A *Adv. Space Res.* **17** 113 (1996)
44. Ващенюк Е В и др. *Геомагнетизм и аэрономия* **48** 157 (2008); Vashenyuk E V et al. *Geomagn. Aeron.* **48** 149 (2008)
45. Балабин Ю В и др. *Изв. РАН Сер. физ.* **73** 321 (2009); Balabin Yu V et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **73** 304 (2009)
46. Timashkov D A et al., in *Proc. of the 30th Intern. Cosmic Ray Conf., July 3–11, 2007, Mérida, Yucatán, Mexico* Vol. 1 (Eds R Caballero et al.) (Mexico City, Mexico: Univ. Nacional Autónoma de México, 2008) p. 209
47. Abbasi R et al. (*IceTop Collab.*) *Astrophys. J. Lett.* **689** L65 (2008)
48. Gosling J T *J. Geophys. Res.* **98** 18937 (1993)
49. Белов А В и др., в сб. *Электромагнитные и плазменные процессы от Солнца до ядра Земли* (Отв. ред. В В Мигулин) (М.: Наука, 1989) с. 49
50. Li C et al. *Astrophys. J.* **770** 34 (2013)
51. Reames D V *Rev. Geophys.* **33** (S1) 585 (1995)
52. Shea M A, Smart D F, in *Biological Effects and Physics of Solar and Galactic Cosmic Radiation* (NATO ASI Series, Ser. B, Vol. 243, Eds C E Swenberg, G Horneck, E G Stassinopoulos) (New York: Plenum Press, 1993) p. 37
53. Smart D F, Shea M A *Solar Phys.* **16** 484 (1971)
54. Dodson H W et al. *Catalogue of Solar Particle Events 1955–1969* (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 49, Eds Z Švestka, P Simon) (Dordrecht: Kluwer Acad., 1975)
55. Akinyan S T et al. *Catalogue of Solar Proton Events 1970–1979* (Ed. Yu I Logachev) (Moscow: Nauka, IZMIRAN, 1983)

56. Bazilevskaya G A et al. *Catalogue of Energetic Spectra of Solar Proton Events 1970–1979* (Ed. Yu I Logachev) (Moscow: Nauka, 1986)
57. Bazilevskaya G A et al. *Catalogue of Solar Proton Events 1980–1986 Pt. 1, 2* (Ed. Yu I Logachev) (Moscow: World Data Center B-2, 1990)
58. Sladkova A I *Radiat. Meas.* **26** 447 (1996)
59. Sladkova A I et al. *Catalogue of Solar Proton Events 1987–1996* (Ed. Yu I Logachev) (Moscow: Univ. Press, 1998)
60. Logachev Yu I et al. *Catalogue of Solar Proton Events in the 23rd Cycle of Solar Activity. 1996–2008* (Ed. Yu I Logachev) (Moscow: World Data Centers, 2016); [http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/Catalog\\_SPE\\_23\\_cycle\\_SA.pdf](http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/Catalog_SPE_23_cycle_SA.pdf)
61. NOAA Space Environment Center. Solar Proton Events Affecting the Earth Environment Preliminary Listing 1976–present (2018), <http://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/>
62. Мирошниченко Л И, Карпов С Н *Геомагнетизм и аэрономия* **44** 601 (2004); Miroshnichenko L I, Karpov S N *Geomagn. Aeron.* **44** 554 (2004)
63. Li C, Miroshnichenko L I, Fang C *Res. Astron. Astrophys.* **15** 1036 (2015)
64. Atwell W et al., in *45th Intern. Conf. on Environmental Systems, ICES 2015, July 12–16, 2015, Bellevue, WA, USA*, p. 340
65. Cliver E W, Dröge W, Müller-Mellin R J. *Geophys. Res.* **98** 15231 (1993)
66. Kahler S W et al. *J. Geophys. Res.* **89** 9683 (1984)
67. Kallenrode M-B, Cliver E W, in *Proc. of the 27th Intern. Cosmic Ray Conf., 7–15 August, 2001, Hamburg, Germany* Vol. 8 (Berlin: Copernicus Gesellschaft, 2001) p. 3314; in *Proc. of the 27th Intern. Cosmic Ray Conf., 7–15 August, 2001, Hamburg, Germany* Vol. 8 (Berlin: Copernicus Gesellschaft, 2001) p. 3318
68. Филиппов А Т, Чирков Н П *Изв. АН СССР Сер. физ.* **42** 1078 (1978)
69. Кузьмин А И, Филиппов А Т, Чирков Н П *Изв. АН СССР Сер. физ.* **47** 1703 (1983)
70. Ellison D C, Ramaty R *Astrophys. J.* **298** 400 (1985)
71. Simnett G M *Phil. Trans. R. Soc. London A* **336** 439 (1991)
72. Mewaldt R A et al. *J. Geophys. Res.* **110** A09S18 (2005)
73. Mewaldt R A *Space Sci. Rev.* **124** 303 (2006)
74. Mewaldt R A et al., in *Proc. of the 30th Intern. Cosmic Ray Conf., July 3–11, 2007, Mérida, Yucatán, Mexico* Vol. 1 (Eds R Caballero et al.) (Mexico City, Mexico: Univ. Nacional Autónoma de México, 2008) p. 1167
75. Band B et al. *Astrophys. J.* **413** 281 (1993)
76. Karpov S N, Miroshnichenko L I, in *Proc. of the 30th Intern. Cosmic Ray Conf., July 3–11, 2007, Mérida, Yucatán, Mexico* Vol. 1 (Eds R Caballero et al.) (Mexico City, Mexico: Univ. Nacional Autónoma de México, 2008) p. 413
77. Miroshnichenko L I *Radiation Measurements* **26** 421 (1996)
78. Струминский А Б, в сб. *Солнечная и земная физика — 2015. XIX Всеросс. ежегодная конф. по физике Солнца, 5–9 октября 2015, Санкт-Петербург, Россия. Труды* (Отв. ред. А В Степанов, Ю А Наговицын) (СПб.: Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, 2015) с. 343
79. Сыроватский С И *ЖЭТФ* **40** 1788 (1961); Syrovatskii S I *Sov. Phys. JETP* **13** 1257 (1961)
80. Wang R *Astropart. Phys.* **31** 149 (2009)
81. Переся-Пераса Х и др. *Геомагнетизм и аэрономия* **32** (2) 1 (1992)
82. Сыроватский С И *Астрон. журн.* **43** 340 (1966); Syrovatskii S I *Sov. Astron.* **10** 270 (1966)
83. Сыроватский С И *ЖЭТФ* **50** 1133 (1966); Syrovatskii S I *Sov. Phys. JETP* **23** 754 (1966)
84. Syrovatskii S I *Solar Phys.* **76** 3 (1982)
85. Сомов Б В *УФН* **180** 997 (2010); Somov B V *Phys. Usp.* **53** 954 (2010)
86. Франк А Г *УФН* **180** 982 (2010); Frank A G *Phys. Usp.* **53** 941 (2010)
87. Somov B V *Plasma Astrophysics Pt. I Fundamentals and Practice* Astrophysics and Space Science Library, Vol. 391 2nd ed. (New York: Springer, 2013); *Plasma Astrophysics Pt. II Reconnection and Flares* (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 392) 2nd ed. (New York: Springer, 2013)
88. Priest E, Forbes T *Magnetic Reconnection: MHD Theory and Applications* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000); Пер. на русск. яз.: Прест Э, Форбс Т *Магнитное пересоединение* (М.: Физматлит, 2005)
89. Сомов Б В, Орешина А В *Изв. РАН Сер. физ.* **75** 784 (2011); Somov B V, Oreshina A V *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **75** 735 (2011)
90. Gopalswamy N, Nitta N V *Space Sci. Rev.* **171** 1 (2012)
91. Pérez-Peraza J et al. *Astrophys. J.* **695** 865 (2009)
92. Kahler S *Astrophys. J.* **428** 837 (1994)
93. Мирошниченко Л И *Изв. РАН Сер. физ.* **67** 400 (2003)
94. Топтыгин И Н *Космические лучи в межпланетных магнитных полях* (М.: Наука, 1983); Пер. на англ. яз.: Toptygin I N *Cosmic Rays in Interplanetary Magnetic Fields* (Dordrecht: D. Reidel, 1985)
95. Vashenyuk E V, Balabin Yu V, Gvozdevsky B B *Astrophys. Space Sci. Trans.* **7** 459 (2011)
96. Miroshnichenko L I *J. Moscow Phys. Soc.* **7** 17 (1997)
97. Vashenyuk E V et al., in *Proc. of the 25th Intern. Cosmic Ray Conf., 30 July–6 August, 1997, Durban, South Africa* Vol. 1 (Eds M S Potgieter, C Raubenheimer, D J van der Walt) (Transvaal, South Africa: Potchefstroom Univ., 1997) p. 161
98. Podgorny I M et al. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **72** 988 (2010)
99. Крымский Г Ф *ДАН СССР* **234** 1306 (1977); Krymskii G F *Sov. Phys. Dokl.* **22** 327 (1977)
100. Zank G P, Rice W K M, Wu C C *J. Geophys. Res.* **105** 25079 (2000)
101. Бережко Е Г, Таинев С Н *Письма в Астрон. журн.* **29** 601 (2003); Berezhko E G, Taneev S N *Astron. Lett.* **29** 530 (2003)
102. Бережко Е Г, Таинев С Н *Письма в Астрон. журн.* **39** 443 (2013); Berezhko E G, Taneev S N *Astron. Lett.* **39** 393 (2013)
103. Крымский Г Ф и др. *Письма в ЖЭТФ* **102** 372 (2015); Krymsky G F et al. *JETP Lett.* **102** 335 (2015)
104. Бережко Е Г, Крымский Г Ф *УФН* **154** 49 (1988); Berezhko E G, Krymskii G F *Sov. Phys. Usp.* **31** 27 (1988)
105. Бережко Е Г и др. *Письма в Астрон. журн.* **22** 290 (1996); Berezhko E G et al. *Astron. Lett.* **22** 260 (1996)
106. Shea M A, Smart D F *AIP Conf. Proc.* **374** 131 (1996)
107. Shea M A, Smart D F, in *Proc. of the 25th Intern. Cosmic Ray Conf., 30 July–6 August, 1997, Durban, South Africa* Vol. 1 (Eds M S Potgieter, C Raubenheimer, D J van der Walt) (Transvaal, South Africa: Potchefstroom Univ., 1997) p. 129
108. Nemzek R J et al. *J. Geophys. Res.* **99** 4221 (1994)
109. Fedorov Yu I et al., in *Proc. of the 25th Intern. Cosmic Ray Conf., 30 July–6 August, 1997, Durban, South Africa* Vol. 1 (Eds M S Potgieter, C Raubenheimer, D J van der Walt) (Transvaal, South Africa: Potchefstroom Univ., 1997) p. 193
110. Cliver E W et al. *Astrophys. J.* **260** 362 (1982)
111. Kahler S W, Simnett G M, Reiner M J, in *Proc. of the 28th Intern. Cosmic Ray Conf., July 31–August 7, 2003, Tsukuba, Japan* Vol. 7 (Eds T Kajita et al.) (Tokyo: Universal Acad. Press, 2003) p. 3415
112. Bazilevskaya G A *Adv. Space Res.* **43** 530 (2009)
113. Aschwanden M J *Space Sci. Rev.* **171** 3 (2012)
114. Gopalswamy N et al. *Space Sci. Rev.* **171** 23 (2012)
115. Kuznetsov S N et al. *Solar Phys.* **268** 175 (2011)
116. Струминский А Б, Зимовец И В *Изв. РАН Сер. физ.* **73** 332 (2009); Strelminsky A B, Zimovets I V *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **73** 315 (2009)
117. Klecker B *J. Phys. Conf. Ser.* **409** 012015 (2013)
118. Cane H V et al. *J. Geophys. Res.* **111** A06S90 (2006)
119. Meyer J-P *Astrophys. J. Suppl.* **57** 151 (1985)
120. Laming J M *Astrophys. J.* **614** 1063 (2004)
121. Томозов В М, в сб. *Солнечно-земная физика* Вып. 20 (Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012) с. 19
122. Desai M I et al. *Space Sci. Rev.* **130** 243 (2007)
123. Cohen C M S et al. *J. Geophys. Res.* **110** A09S16 (2005)
124. Desai M, Giacalone J *Living Rev. Solar Phys.* **13** 3 (2016)
125. Cane H V et al. *J. Geophys. Res.* **111** A06S90 (2006)
126. Tylka A J et al. *Astrophys. J.* **625** 474 (2005)
127. Kahler S W et al. *Space Sci. Rev.* **171** 121 (2012)
128. Kahler S W *J. Geophys. Res.* **87** 3439 (1982)
129. Battaglia M, Grigis P C, Benz A O *Astron. Astrophys.* **439** 737 (2005)
130. Mitra-Kraev U et al. *Astron. Astrophys.* **431** 679 (2005)
131. Chiba N et al. *Astropart. Phys.* **1** 27 (1992)
132. Struminsky A, Matsuoka M, Takahashi K *Astrophys. J.* **429** 400 (1994)
133. Miyasaka H et al., in *Proc. of the 29th Intern. Cosmic Ray Conf., August 3–10, 2005, Pune, India* Vol. 1 (Eds B S Acharya et al.) (Mumbai: Tata Institute of Fundamental Research, 2005) p. 241
134. Sako I et al. *Astrophys. J. Lett.* **651** L69 (2006)
135. Miroshnichenko L I, Yanke V G *Solar Phys.* **291** 3685 (2016)
136. Gnevyshev M N *Solar Phys.* **51** 175 (1977)
137. Miroshnichenko L I *Adv. Space Res.* **36** 1742 (2005)
138. Mironova I A et al. *Space Sci. Rev.* **194** 1 (2015)
139. Мирошниченко Л И и др. *Геомагнетизм и аэрономия* **52** 579 (2012); Miroshnichenko L I et al. *Geomagn. Aeron.* **52** 547 (2012)
140. Gupta M, Mishra V K, Mishra A P *J. Geophys. Res.* **112** A05105 (2007)
141. Nagashima K, Sakakibara S, Morishita I *J. Geomagn. Geoelectr.* **43** 685 (1991)
142. Мирошниченко Л И *Изв. РАН Сер. физ.* **67** 462 (2003)
143. Maehara H et al. *Nature* **485** 478 (2012)
144. Shibata K et al. *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **65** 49 (2013)
145. Aschwanden M J, Freeland S L *Astrophys. J.* **754** 112 (2012)
146. Aschwanden M J *Astron. Astrophys.* **539** A2 (2012)
147. Aschwanden M J et al. *Astrophys. J.* **535** 1047 (2000)

148. Shimizu T *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **47** 251 (1995)
149. Crosby N B, Aschwanden M J, Dennis B R *Solar Phys.* **143** 275 (1993)
150. Shea M A, Smart D F *Solar Phys.* **127** 297 (1990)
151. Damon P E, Long A, Wallack E I *Earth Planet. Sci. Lett.* **20** 300 (1973)
152. Fan C Y et al., in *Proc. of the 19th Intern. Cosmic Ray Conf., 11–23 August 1985, San Diego, CA* Vol. 5 (Washington, DC: NASA, 1985) p. 371
153. Dreschhoff G A M, Zeller E J *Solar Phys.* **127** 333 (1990)
154. Kepko L et al. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **71** 1840 (2009)
155. McCracken K G et al. *J. Geophys. Res.* **106** 21585 (2001)
156. Townsend L W et al. *Adv. Space Res.* **38** 226 (2006)
157. Miroshnichenko L I, Nyymik R A *Radiat. Measur.* **61** 6 (2014)
158. Smart D F, Shea M A, McCracken K G *Adv. Space Res.* **38** 215 (2006)
159. Wolff E W et al. *Geophys. Res. Lett.* **39** L08503 (2012)
160. Schrijver C J et al. *J. Geophys. Res.* **117** A08103 (2012)
161. Usoskin I G, Kovaltsov G A *Astrophys. J.* **757** 92 (2012)
162. Miyake F et al. *Nature* **486** 240 (2012)
163. Usoskin I G et al. *Astron. Astrophys.* **552** L3 (2013)
164. Jull A J T et al. *Geophys. Res. Lett.* **41** 3004 (2014)
165. Thomas B C et al. *Geophys. Res. Lett.* **40** 1237 (2013)
166. Pavlov A K et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **435** 2878 (2013)
167. Cliver E W et al. *Astrophys. J.* **781** 32 (2014)
168. Павлов А К и др. *Письма в Астрон. журн.* **40** 706 (2014); Pavlov A K et al. *Astrophys. Lett.* **40** 640 (2014)
169. Király P, Wolfendale A W, in *Proc. of the 26th Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC, August 17–25, 1999, Salt Lake City, Utah, USA* Vol. 6 (Eds D Kieda, M Salamon, B Dingus) (New York: AIP, 1999) p. 163
170. Miroshnichenko L I *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **70** 450 (2008)
171. Quack M et al., in *Proc. of the 27th Intern. Cosmic Ray Conf., 7–15 August, 2001, Hamburg, Germany* Vol. 10 (Berlin: Copernicus Gesellschaft, 2001) p. 4023
172. Kirillov A S et al., in *Proc. of the 30th Intern. Cosmic Ray Conf., July 3–11, 2007, Mérida, Yucatán, Mexico* Vol. 1 (Eds R Caballero et al.) (Mexico City, Mexico: Univ. Nacional Autónoma de México, 2008) p. 773
173. Webber W R, Higbie P R, McCracken K G *J. Geophys. Res.* **112** A10106 (2007)
174. Dorman L I et al., in *Solar-Terrestrial Predictions. Proc. of a Workshop at Leura, Australia, October 16–20, 1989* (Eds R J Thompson et al.) (Boulder, CO: National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, 1990) p. 1386
175. Belov A V, Eroshenko E A *Radiat. Measur.* **26** 461 (1996)
176. Dorman L, Zukerman I *Adv. Space Res.* **31** 925 (2003)
177. Вапенинок Э В и др. *Изв. РАН Сер. физ.* **75** 819 (2011); Vashe-nyuk E V et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **75** 770 (2011)
178. Бесселовский И С, Яковчук О С *Астрон. вестн.* **45** 365 (2011); Veselovskii I S, Yakovchuk O S *Solar Syst. Res.* **45** 354 (2011)
179. Mavromichalaki H et al., in *Proc. of the 31st Intern. Cosmic Ray Conf., 7–15 July 2009, Lodz, Poland* (Lodz: Univ. of Lodz, 2009) p. 4
180. Perez-Peraza J et al., in *Proc. of the 32nd Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC2011, 11–18 August, 2011, Beijing, China* Vol. 10 (Beijing: IHEP, 2011) p. 151
181. Pérez-Peraza J, Juárez-Zuñiga A *Astrophys. J.* **803** 27 (2015)
182. Shea M A, Smart D F *Space Sci. Rev.* **171** 161 (2012)
183. Bütkofer R et al., in *Proc. of the 33rd Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC2013, Rio de Janeiro, Brazil, July 2–9, 2013*
184. Kovaltsov G A et al. *Solar Phys.* **289** 4691 (2014)
185. Nitta N V et al. *Space Sci. Rev.* **171** 61 (2012)
186. Moraal H, McCracken K G *Space Sci. Rev.* **171** 85 (2012)
187. Mewaldt R A et al. *Space Sci. Rev.* **171** 97 (2012)
188. Li G et al. *Space Sci. Rev.* **171** 141 (2012)
189. Кужевский Б М, Мирошниченко Л И, Троицкая Е В *Астрон. журн.* **82** 637 (2005); Kuzhevskij B M, Miroshnichenko L I, Troitskaia E V *Astron. Rep.* **49** 567 (2005)
190. Tatischeff V et al. *Astrophys. J. Suppl.* **165** 606 (2006)
191. Murphy R J et al. *Astrophys. J. Suppl.* **168** 167 (2007)
192. Miroshnichenko L I, Gan W Q *Adv. Space Res.* **50** 736 (2012)
193. Valdés-Galicia J F et al. *Adv. Space Res.* **43** 565 (2009)
194. Vestrand W T, Forrest D J *Astrophys. J. Lett.* **409** L69 (1993)
195. Cárdenas B V, Valdés-Galicia J F *Adv. Space Res.* **49** 1593 (2012)
196. Kanbach G et al. *Astron. Astrophys. Suppl.* **97** 349 (1993)
197. Akimov V V et al. *Solar Phys.* **166** 107 (1996)
198. Chertok I M, in *Proc. of the 24th Intern. Cosmic Ray Conf., August 28–September 8, 1995, Rome, Italy* Vol. 4 (Eds N Iucci, E Lamanna) (Rome: IUPAP, 1995) p. 78
199. Chertok I M *J. Moscow Phys. Soc.* **7** 31 (1997)
200. Trotter G E et al. *Solar Phys.* **290** 819 (2015)
201. Grechnev V V et al. *Solar Phys.* **290** 2827 (2015)
202. Кузнецов В Д *УФН* **180** 988 (2010); Kuznetsov V D *Phys. Usp.* **53** 947 (2010)
203. Čalogović J, Laken B A *Centr. Eur. Astrophys. Bull.* **39** 145 (2015)
204. Aulanier G et al. *Astron. Astrophys. A* **549** A66 (2013)
205. Livshits M A et al. *Adv. Space Res.* **55** 920 (2015)
206. Kitchatinov L L, Olemskoy S V *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **459** 4353 (2016)
207. Кацова М М и др. *Астрон. журн.* **95** 78 (2018); Katsova M M et al. *Astron. Rep.* **62** 72 (2018)
208. Попова Е П, Кузнецов Н В, Панасюк М И *Изв. РАН Сер. физ.* **81** 192 (2017); Popova E P, Kuznetsov N V, Panasyuk M I *Bull. Russ. Acad. Sci.* **81** 173 (2017)
209. Miyake F, Masuda K, Nakamura T *Nature Commun.* **4** 1748 (2013)
210. Miyake F et al. *Geophys. Res. Lett.* **42** 84 (2015)
211. Wang F Y et al. *Nature Commun.* **8** 1487 (2017)
212. Mekhaldi F et al. *Nature Commun.* **6** 8611 (2015)
213. Kovaltsov G A, Usoskin I G *Solar Phys.* **289** 211 (2014)
214. Smart D F et al. *J. Geophys. Res.* **119** 9430 (2014)
215. Wolff E W et al. *J. Geophys. Res.* **121** 1920 (2016)
216. Duderstadt K A et al. *J. Geophys. Res.* **121** 2994 (2016)
217. Sukhodolov T et al. *Sci. Rep.* **7** 45257 (2017)
218. Mekhaldi F et al. *J. Geophys. Res. Atm.* **122** 11900 (2017)
219. Traversi R et al. *Sci. Rep.* **6** 20235 (2016)
220. Ogurtsov M G, Oinonen M J. *Atmos. Solar-Terr. Phys.* **109** 37 (2014)
221. Sigl M et al. *Nature* **523** 543 (2015)
222. Miroshnichenko L I *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **70** 450 (2008)
223. Beer J, McCracken K, von Steiger R *Cosmogenic Radionuclides* (Berlin: Springer, 2012)
224. Криволуцкий А А, Репнёв А И *Геомагнетизм и аэрономия* **52** 723 (2012); Krivolutsky A A, Repnev A I *Geomagn. Aeron.* **52** 685 (2012)

## Solar cosmic rays: 75 years of research

**L.I. Miroshnichenko**

*N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Russian Academy of Sciences, Kaluzhskoe shosse 4, 108840 Troitsk, Moscow, Russian Federation;*  
*Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Leninskie gory 1, 119991 Moscow, Russian Federation. E-mail: leonty@izmiran.ru*

28 February 2017 marked the 75th anniversary of the first confident detection of solar cosmic rays (SCRs), the term referring to accelerated solar particles with energies from about  $10^6$  to  $\sim 10^{10}–10^{11}$  eV. The present paper reviews the key observational and theoretical results on SCRs that have been accumulated over this period. The history of the discovery of SCRs is briefly described together with SCR recording techniques and instruments, and some physical, methodical and practical aspects of SCR generation are discussed in more detail. Special attention is given to charged particle acceleration mechanisms at and near the Sun. Current ideas on the interaction of solar cosmic rays with the solar atmosphere, their transport in interplanetary magnetic fields, Earth's magnetospheric movements and their impact on the Earth's atmosphere are reviewed. It is shown that this field of space physics produced many results of fundamental interest for astrophysics, solar-terrestrial physics, geophysics and practical cosmonautics (astronautics).

**Keywords:** Sun, solar flares, particle acceleration, solar cosmic rays

PACS numbers: 61.05.fg, **61.46.–w**, 75.50.Mm

Bibliography — 224 references

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **188** (4) 345–376 (2018)  
DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.03.038091>

Received 29 December 2016, revised 28 February 2017

*Physics – Uspekhi* **61** (4) (2018)  
DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.03.038091>