

Соотношения между параметрами спектров околоземных протонных возрастаний, всплесков жёсткого рентгеновского излучения и скоростями КВМ

В.И. Киселёв, Н.С. Мешалкина, В.В. Гречнев (ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, valentin_kiselev@iszf.irk.ru)

Аннотация. В некоторых исследованиях предложен сценарий переноса ускоренных во вспышке протонов в эруптивном магнитном жгуте до его пересоединения с открытой магнитной структурой, освобождающего захваченные частицы. Кулоновские столкновения в магнитном жгуте обедняют спектр протонов в области низких энергий. С другой стороны, ускорение на ударной волне постепенно восполняет эту часть спектра. Эти процессы формируют двойной степенной спектр протонов, обычно наблюдаемый на орбите Земли. Проанализированы корреляции между наклонами спектров околоземных протонных возрастаний ниже и выше энергии излома, фотонными индексами всплесков жёсткого рентгеновского (ЖР) излучения в родительских вспышках и скоростями корональных выбросов массы (КВМ). Используются каталоги протонных событий в 1991–2006 г., спектры ЖР излучения, полученные Yohkoh и RHESSI, и каталоги КВМ. Значимые корреляции обнаружены между наклонами спектров протонов: 1) выше энергии излома и спектральными индексами ЖР излучения (0,86) и 2) ниже энергии излома и скоростями КВМ (-0,75). Диапазон энергий излома в проанализированных событиях – от 3 до 60 МэВ. Результаты указывают на статистическое преобладание всплещного ускорения для более высоких энергий протонов и ускорения ударными волнами для более низких энергий. В спектрах протонов наивысших энергий, восстановленных для событий с наземными возрастаниями интенсивности космических лучей (GLE), проявляется второй излом, выше которого наклон наиболее крутой. Ни этот наклон, ни энергия второго излома не коррелирует ни с одним из прочих параметров. Этот факт требует дальнейшего анализа. Выявлено различие в параметрах спектров протонов в событиях с GLE и без них. Типичные для этих двух групп событий наклоны спектров протонов выше энергии первого излома различаются в 1,4 раза, а наклоны ниже этой энергии одинаковы, что согласуется с выводами Mewaldt et al. (2012). Для исследованных наборов событий также выявлены различия характерных значений параметра $\lg(I_{10\text{max}}/I_{100\text{max}})$ в 2 раза и энергий первого излома в 3 раза.

1. Введение. Ускорение протонов возможно во вспышках и на ударных волнах, связанных с быстрыми КВМ. Протоны обнаруживаются по косвенным проявлениям и в межпланетном пространстве. Импульсные всплески γ -излучения подтверждают ускорение протонов во вспышках, а свойства более тяжёлых ионов указывают на их ускорение ударными волнами. Значит, вероятен вклад и всплесков, и ударных волн. Trotter et al. (2015) и Dierckx et al. (2015) пришли к выводу, что ускорение протонов вспышками преобладает для высоких энергий, а ударными волнами – для низких.

Результаты статистического анализа соотношений между параметрами всплещного излучения, околоземных протонных возрастаний и КВМ неоднозначны. Kahler (1982) подчёркивал важность соответствия параметров спектров протонов у Земли и их источников, не найдя значимой корреляции между пиковым потоком протонов и частотой микроволнового спектрального максимума. Показанная Chertok et al. (2009) тенденция, связывающая параметры спектров микроволновых всплесков и протонных возрастаний, не выглядит решающей из-за сложной зависимости микроволнового излучения от параметров ускоренных электронов. Благодаря простому соотношению между наклонами спектров ускоренных электронов и производимого ими в толстой мишени тормозного излучения ожидается более явное соответствие между наклонами спектра протонов и ЖР излучения.

Masson et al. (2013), Kocharov et al. (2017) и Grechnev et al. (2017) пришли к выводу об инжекции ускоренных вспышкой протонов как во всплещные петли, так и в формирующийся магнитный жгут, где они удерживаются до пересоединения жгута с открытой структурой (Рис. 1). Кулоновские столкновения в жгуте обедняют спектр протонов в области низких энергий. С другой стороны, ускорение ударной волной постепенно восполняет эту часть спектра. Эти два процесса формируют обычно наблюдаемый у Земли двойной степенной спектр протонов с пологим наклоном γ_{p1} ниже энергии излома и более крутым наклоном γ_{p2} выше неё (напр., Mewaldt et al., 2012). В отличие от предыдущих исследований (Bhatt et al., 2013, Tripathi et al., 2013), мы анализируем корреляции между каждым из наклонов спектров протонов, с одной стороны, и фотонными индексами соответствующих всплесков ЖР излучения (γ_{HXR}) и скоростями КВМ (V_{CME}), с другой стороны.

3. Статистический анализ. На Рис. 4 показано соотношение между наклонами спектров протонов γ_{p2} выше энергии излома и фотонными индексами γ_{HXR} . Коэффициент корреляции рассчитан для всех событий без учёта долготы вспышек. Для учёта ошибок по обеим осям использована линейная ортогональная регрессия. Коэффициент корреляции между γ_{p2} и γ_{HXR} равен 0,86. Коэффициент корреляции -0,24 между γ_{p2} и V_{CME} показывает незначимую роль ускорения на ударных волнах для протонов высоких энергий. Антикорреляция (-0,75) наклонов спектров протонов ниже энергии излома γ_{p1} со скоростями КВМ V_{CME} (Рис. 5) означает преобладание вклада ударных волн в ускорение протонов низких энергий. Коэффициент корреляции между γ_{p1} и γ_{HXR} незначителен (0,16), как и между γ_{HXR} и V_{CME} .

Каталог Logachev et al. (2016) содержит спектры протонов и для событий, связанных с GLE. В области наивысших энергий спектры восстановлены по данным сети нейтронных мониторов. Спектры событий с GLE имеют тройную степенную форму с двумя изломами и наиболее крутой наклон в области наивысших энергий (Рис. 6). Ни этот наклон, ни энергия второго излома не коррелируют ни с одним другим параметром по неясным причинам.

На Рис. 7a, b показаны распределения значений γ_{p2} и энергий изломов E_0 для исследованных событий с GLE и без GLE, а на Рис. 7c – типичные спектры протонов, построенные по медианным значениям. Наклоны ниже энергии излома одинаковы, а выше излома различаются в 1,4 раза в согласии с выводами Mewaldt et al. (2012). Для исследованных событий выявлены и различия энергий излома в 3 раза и логарифма отношения максимумов потоков с энергиями > 10 МэВ и > 100 МэВ $\lg(I_{10\text{max}}/I_{100\text{max}})$ в 2 раза. Отношение максимумов потоков с энергиями > 1 ГэВ в типичных событиях с GLE и без GLE из исследованных наборов различается на 2 порядка (Рис. 7c).

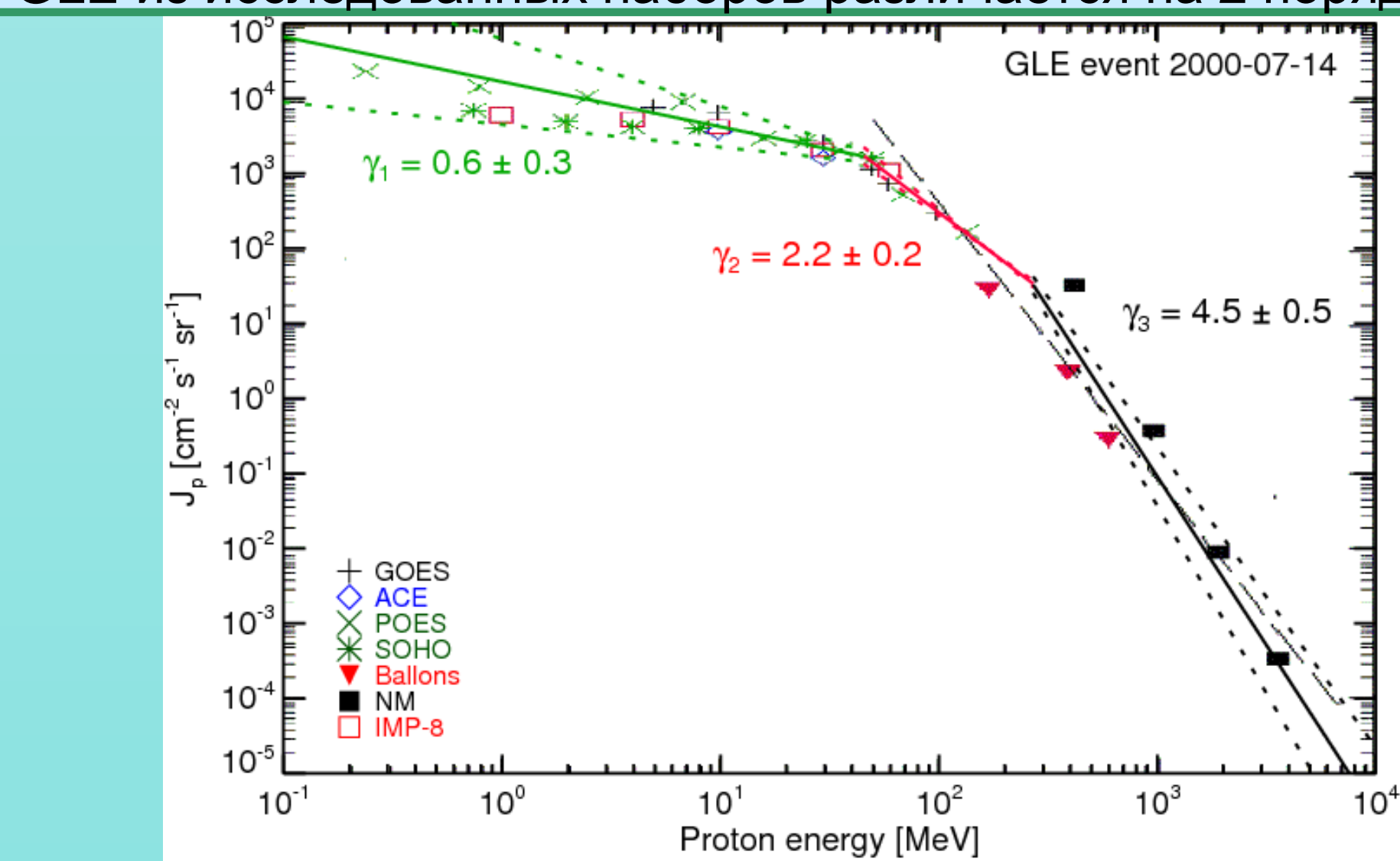


Рис. 6. Интегральный энергетический спектр протонов GLE 14 июля 2000 г. в максимум события с аппроксимацией трёх его ветвей

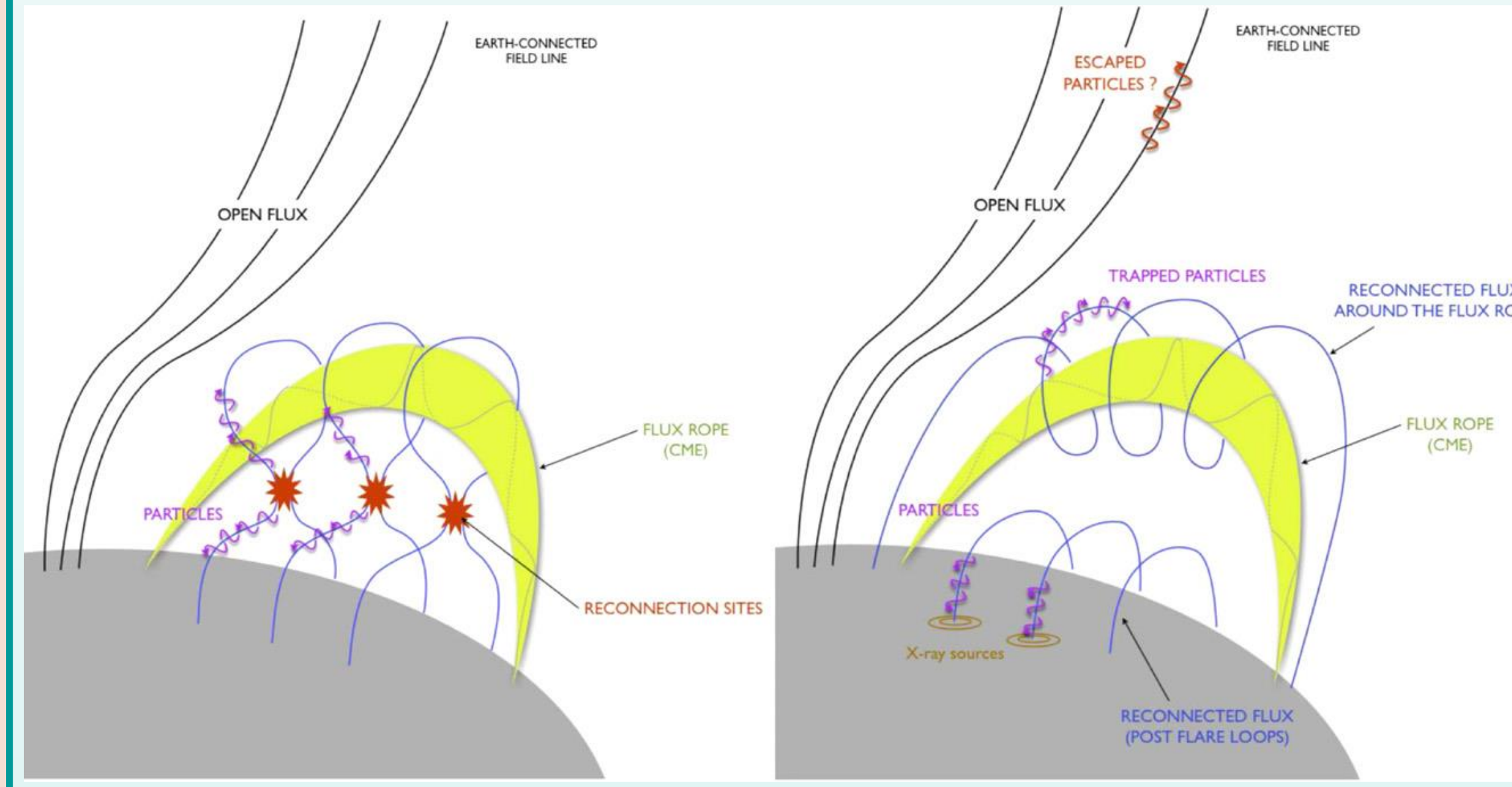


Рис. 1. Сценарий переноса протонов в эруптивном магнитном жгуте (Masson et al., 2013)

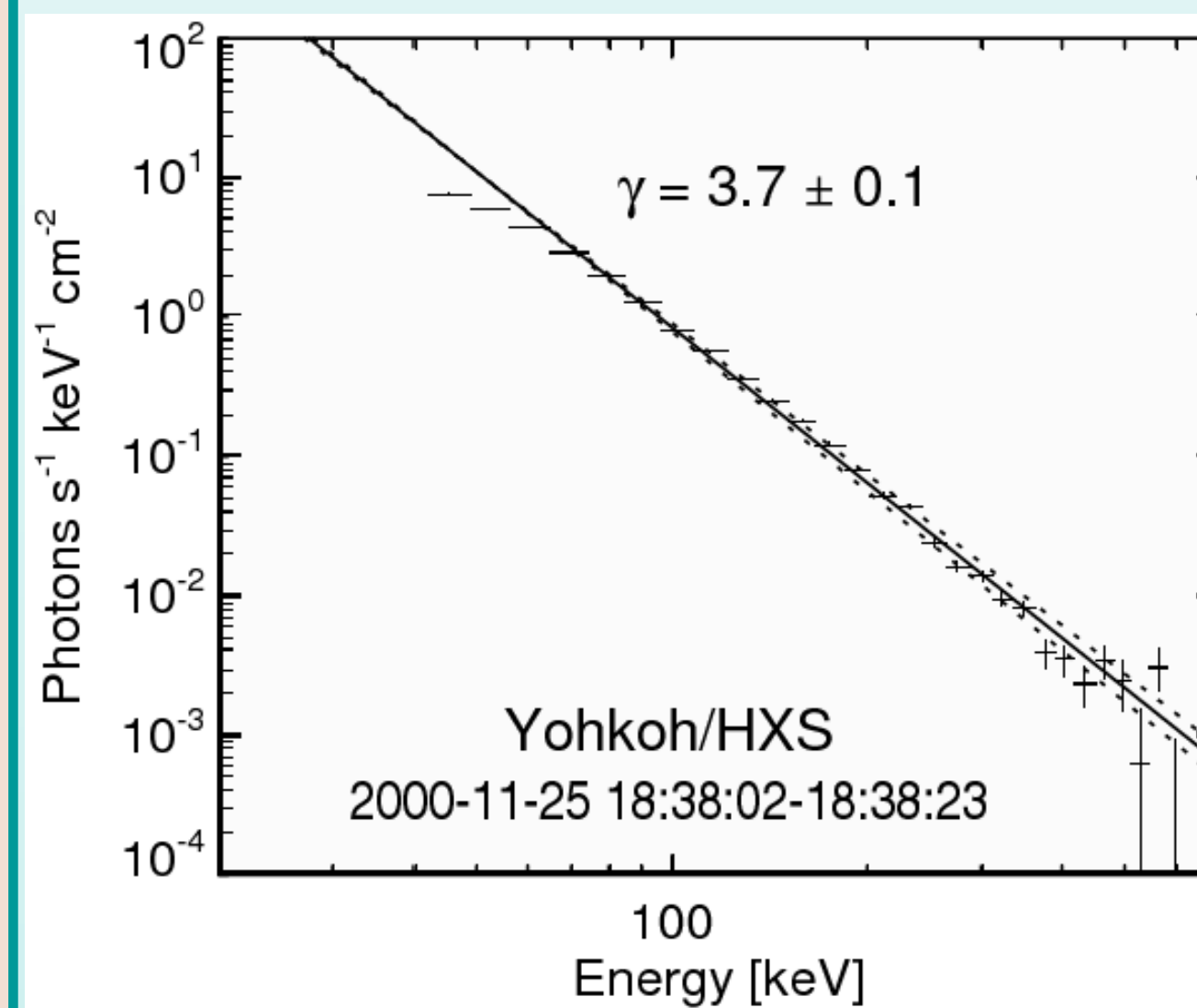


Рис. 3. Фотонный спектр Yohkoh/HXS 25 ноября 2000 г. в максимум всплеска и его аппроксимация

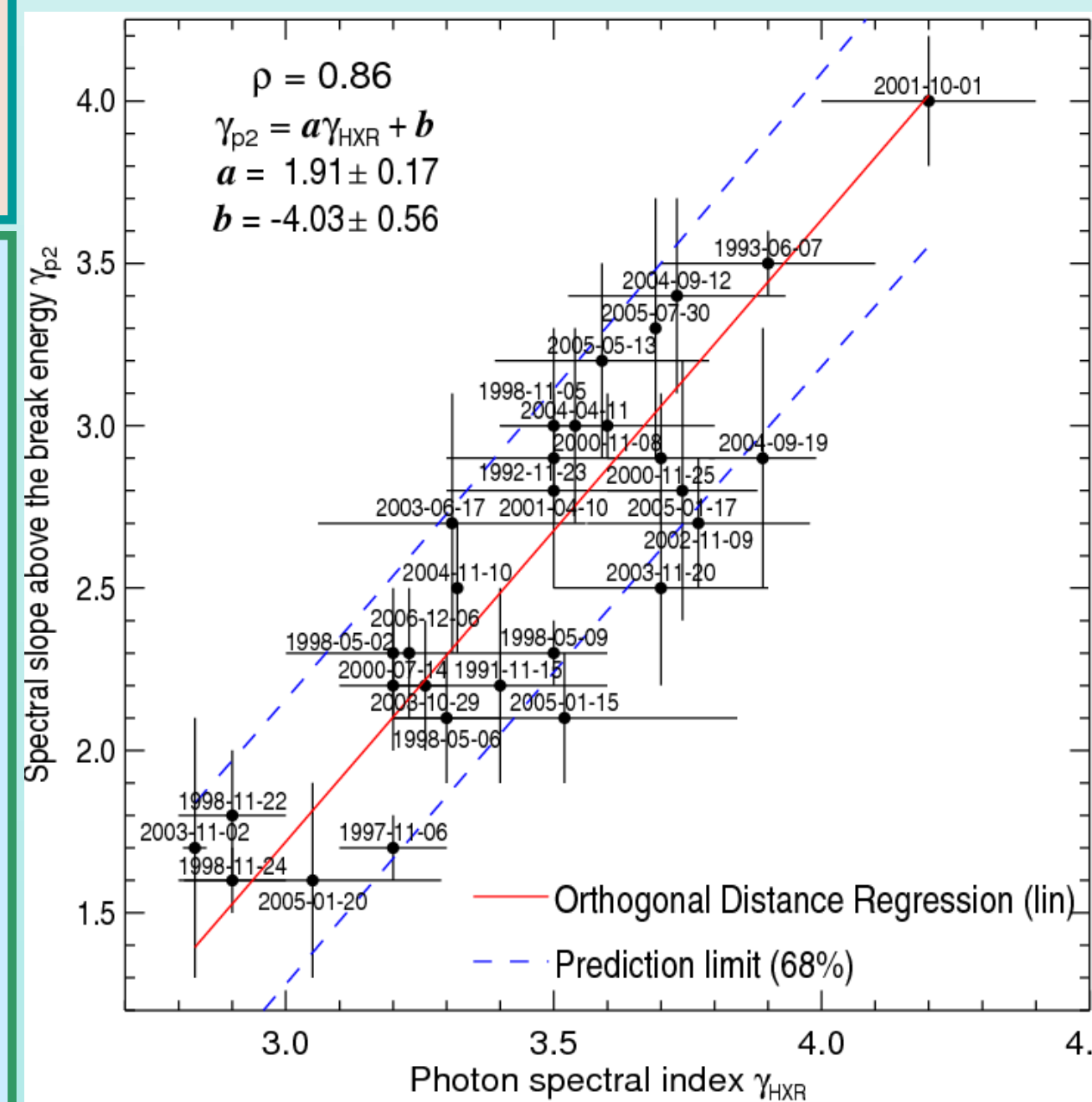


Рис. 4. Соотношение между наклонами спектров протонов выше энергии излома и фотонными индексами жёсткого рентгеновского излучения

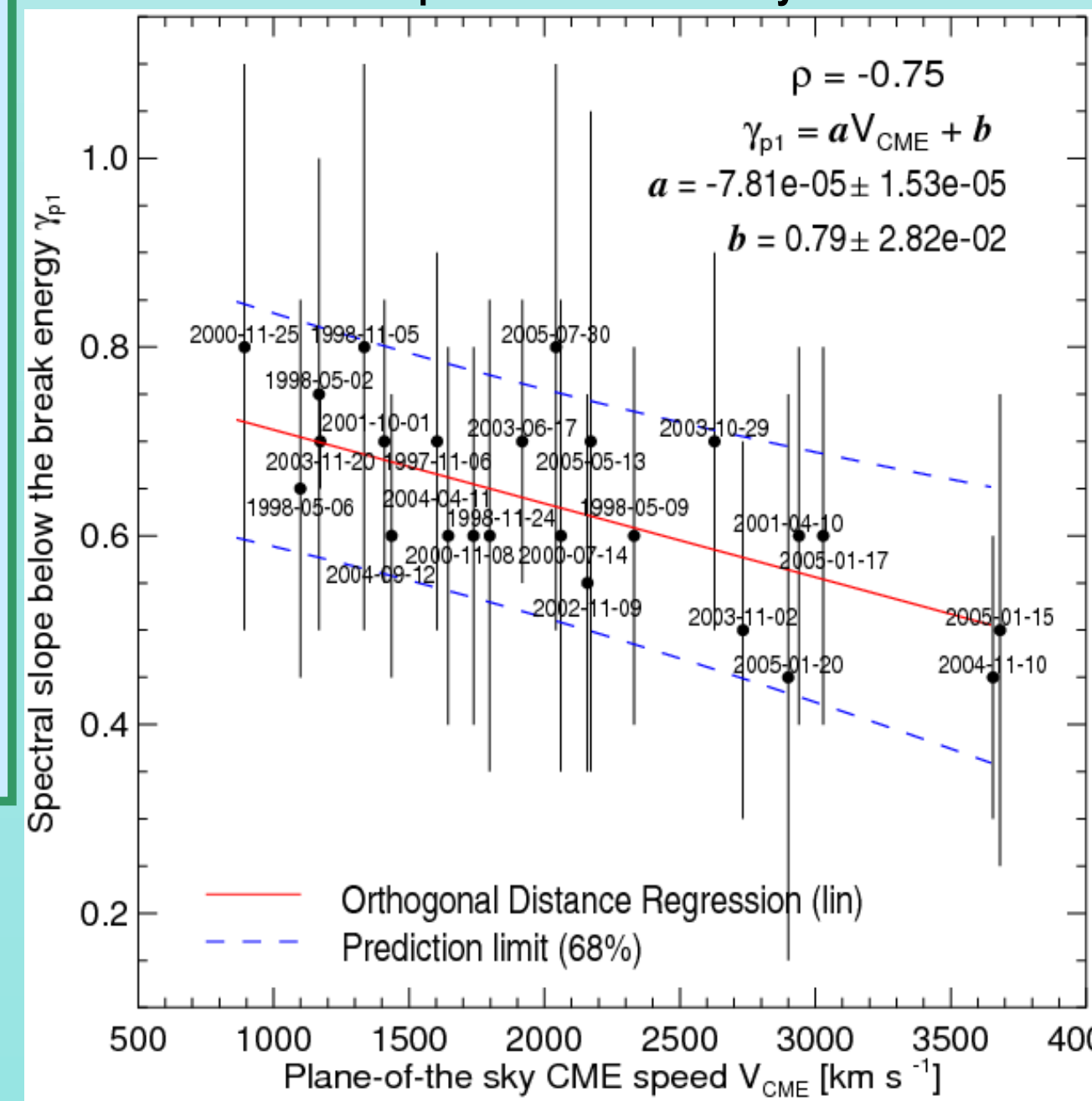


Рис. 5. Соотношение между наклонами спектров протонов ниже энергии излома и скоростями КВМ

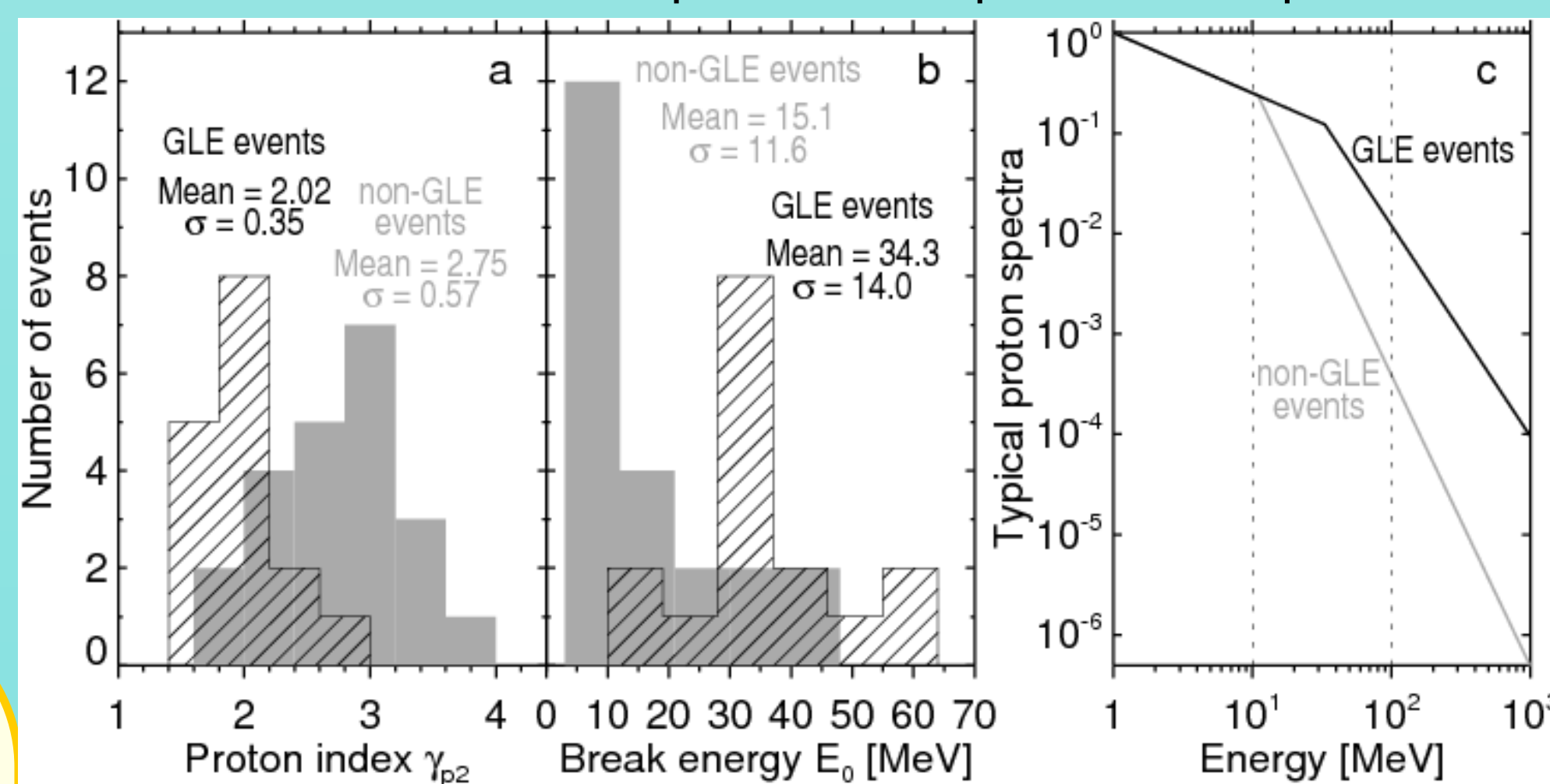


Рис. 7. Распределения наклонов спектров протонов выше энергии излома (a) и энергий излома (b) для событий с GLE и без GLE. Типичные нормированные спектры протонов для событий с GLE и без GLE (c)

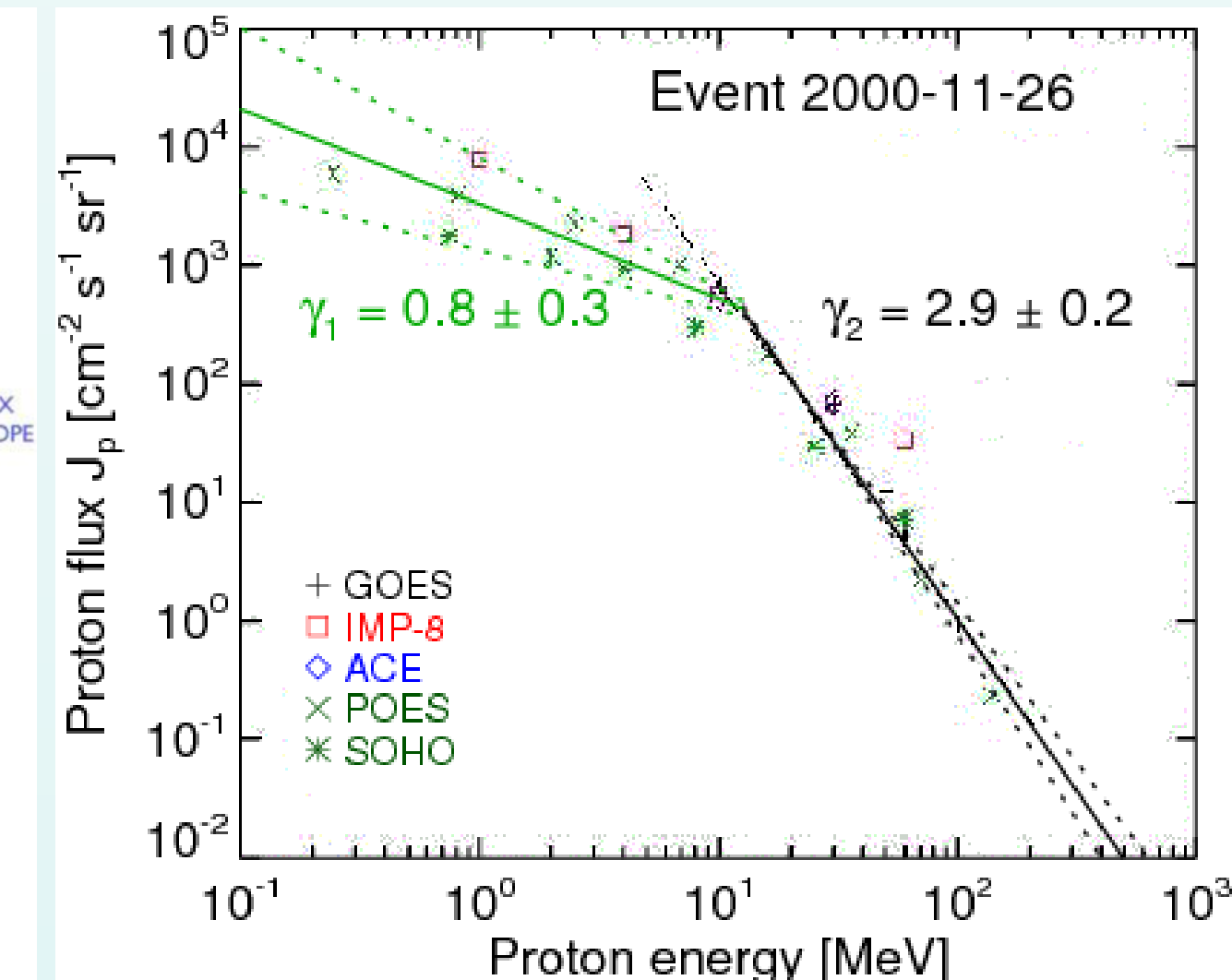


Рис. 2. Интегральный энергетический спектр протонов 26 ноября 2000 г. в максимум возрастания с аппроксимацией двух его ветвей. Пунктирные линии – границы неопределённости

2. Данные. Интегральные спектры в максимуме солнечных протонных возрастаний имеются в каталогах 1987–1996 г. (Sladkova et al., 1998) и 1996–2008 г. (Logachev et al., 2016). Из каталогов отобраны события, для которых солнечные источники протонных возрастаний были установлены, а главная фаза всплеска наблюдалась RHESSI (Lin et al., 2002) или Yohkoh/HXS (Yoshimori et al., 1991). Часть событий была исключена по ряду причин: расположение вспышки за лимбом; пропуск главной фазы всплеска из-за нахождения RHESSI или Yohkoh в тени Земли или в Южно-Атлантической аномалии (SAA); проблемы с данными. Из 94 событий отобрано 30 (Таблицы 1, 2). Степенные индексы спектров протонов слева γ_{p1} и справа γ_{p2} от энергии излома найдены линейной аппроксимацией соответствующей спектральной ветви (< 50 МэВ или 50–200 МэВ). Пример спектра протонов 26 ноября 2000 г. с точкой излома 11 МэВ показан на Рис. 2. Для всех спектров излом наблюдается в диапазоне 3–60 МэВ. Измерения спектральных индексов ЖР (γ_{HXR}) и их ошибок по данным RHESSI выполнены с помощью стандартного программного пакета OSPEX для анализа солнечного рентгеновского излучения. Отсчёты усреднены за 30 сек. вокруг главного, наиболее жёсткого пика. Для аппроксимации использована комбинация одной тепловой и трёх степенных составляющих. Фотонный индекс γ_{HXR} брался в диапазоне 50–200 кэВ. Для оценки γ_{HXR} по данным Yohkoh/HXS спектры, приведённые в каталоге Sato et al. (2006), аппроксимированы степенной функцией в области энергий > 50 кэВ. Пример аппроксимации спектра Yohkoh/HXS 25 ноября 2000 г. показан на Рис. 3. Скорости КВМ взяты из каталога Yashiro et al. (2004; http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/).

Table 1. Events analyzed using RHESSI data.

| No. | Solar flare | | | | | Near-Earth protons | | | | | |
|-----|-------------|-----------|------------|-------------|-----------------------|--------------------|--|-----------|-------------|---------------|---------------|
| | Date | GOES peak | GOES class | RHESSI peak | γ_{HXR} | Position | V_{CME} [km s ⁻¹] | Peak time | E_0 [MeV] | γ_{p1} | γ_{p2} |
| 1 | 2002-11-09 | 13:23 | M4.6 | 13:16:32 | 3.77 ± 0.21 | S04 W29 | 1757/2159 | 10/02:00 | 9 ± 2 | 0.6 ± 0.2 | 2.7 ± 0.2 |
| 2 | 2003-06-17 | 22:55 | M6.8 | 22:46:20 | 3.31 ± 0.25* | S12 E60 | 1779/1918 | 19/06:00 | 5 ± 1 | 0.7 ± 0.2 | 2.7 ± 0.4 |
| 3 | 2003-10-29 | 20:49 | X1.0 | 20:46:00 | 3.26 ± 0.01 | S15 W02 | 1948/2628 | 29/23:00 | 33 ± 6 | 0.7 ± 0.2 | 2.2 ± 0.2 |
| 4 | 2003-11-02 | 17:25 | X8.3 | 17:16:53 | 2.83 ± 0.02 | S14 W56 | 1826/2733 | 02/23:00 | 16 ± 4 | 0.5 ± 0.3 | 1.7 ± 0.4 |
| 5 | 2003-11-20 | 23:53 | M5.8 | 23:49:09 | 3.70 ± 0.20 | N02 W17 | 547/1173 | 22/02:00 | 3 ± 1 | 0.7 ± 0.1 | 2.5 ± 0.3 |
| 6 | 2004-04-11 | 04:19 | C9.6 | 04:15:36 | 3.54 ± 0.01 | S14 W47 | 1645/1645 | 11/12:00 | 6 ± 2 | 0.6 ± 0.2 | 3.0 ± 0.3 |
| 7 | 2004-09-12 | 00:56 | M4.8 | 00:33:51 | 3.73 ± 0.20 | N04 E42 | 1150/1436 | 13/23:00 | 5 ± 1 | 0.6 ± 0.2 | 3.4 ± 0.3 |
| 8 | 2004-09-19 | 17:12 | M1.9 | 16:57:04 | 3.89 ± 0.10 | N03 W90 | ND* | 20/01:00 | 20 ± 5 | 0.5 ± 0.3 | 2.9 ± 0.4 |
| 9 | 2004-11-10 | 02:13 | X2.5 | 02:09:49 | 3.32 ± 0.01 | N07 W51 | 1975/3656 | 10/16:00 | 9 ± 2 | 0.5 ± 0.2 | 2.5 ± 0.2 |
| 10 | 2005-01-15 | 23:02 | X2.6 | 22:48:12 | 3.52 ± 0.32 | N14 W08 | 2861/3682 | 16/18:00 | 9 ± 1 | 0.5 ± 0.3 | 2.1 ± 0.3 |
| 11 | 2005-01-17 | 09:52 | X3.8 | 09:43:29 | 3.74 ± 0.14 | N14 W24 | 2547/3029 | 17/17:00 | 28 ± 7 | 0.6 ± 0.2 | 2.8 ± 0.4 |
| 12 | 2005-01-20 | 07:01 | X7.1 | 06:46:07 | 3.05 ± 0.24 | N12 W58 | 2800/2900 | 20/10:00 | 46 ± 5 | 0.5 ± 0.3 | 1.6 ± 0.3 |
| 13 | 2005-05-13 | 11:57 | M8.0 | 11:42:03 | 3.59 ± 0.20 | N12 E12 | 1689/2171 | 14/14:00 | 8 ± 2 | 0.7 ± 0.4 | 3.2 ± 0.3 |
| 14 | 2005-07-30 | 06:35 | X1.3 | 06:32:29 | 3.69 ± 0.01 | N12 E61 | 1968/2043 | 01/05:00 | 4 ± 1 | 0.8 ± 0.3 | 3.3 ± 0.4 |
| 15 | 2006-12-06 | 18:47 | X6.5 | 18:43:40 | 3.23 ± 0.01 | S06 E63 | ND | 07/22:00 | 12 ± 1 | 0.5 ± 0.2 | 2.3 ± 0.2 |

Table 2. Events analyzed using Yohkoh data.

| No. | Solar flare | | | | | Near-Earth protons | | | | | |
|-----|-------------|-----------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|--|-----------|-------------|---------------|---------------|
| | Date | GOES peak | GOES class | Yohkoh measured interval | γ_{HXR} | Position | V_{CME} [km s ⁻¹] | Peak time | E_0 [MeV] | γ_{p1} | γ_{p2} |
| 1 | 1991-11-15 | 22:40 | X1.5 | 22:37:06-22:37:34 | 3.4 ± 0.2 | S13 W19 | ND* | 16/03:00 | 40 ± 10 | 1.2 ± 0.3 | 2.2 ± 0.3 |
| 2 | 1992-11-23 | 20:32 | M4.4 | 20:24:12-20:25:57 | 3.5 ± 0.2 | S08 W89 | ND | 23/23:00 | 39 ± 5 | 2.2 ± 0.2 | 2.9 ± 0.1 |
| 3 | 1993-06-07 | 14:25 | M5.4 | 14:21:02-14:22:12 | 3.9 ± 0.2 | S10 W30 | ND | 07/16:00 | 39 ± 7 | 1.8 ± 0.2 | 3.5 ± 0.1 |
| 4 | 1997-11-06 | 11:56 | X9.4 | 11:55:20-11:55:48 | 3.2 ± 0.1 | S18 W63 | 1556/1604 | 07/02:00 | 31 ± 4 | 0.7 ± 0.2 | 1.7 ± 0.1 |
| 5 | 1998-05-02 | 13:42 | X1.1 | 13:37:18-13:37:38 | 3.2 ± 0.2 | S15 W15 | 938/1168 | 02/16:00 | 63 ± 10 | 0.8 ± 0.3 | 2.3 ± 0.2 |
| 6 | 1998-05-06 | 08:09 | X2.7 | 08:03:29-08:03:44 | 3.3 ± 0.1 | S15 W64 | 1099/1099 | 06/09:00 | 21 ± 6 | 0.7 ± 0.2 | 2.1 ± 0.2 |
| 7 | 1998-05-09 | 03:40 | M7.7 | 03:22:55-03:24:05 | 3.5 ± 0.1 | S15 W90 | 2331/2331 | 09/13:00 | 22 ± 5 | 0.6 ± 0.2 | 2.3 ± 0.1 |
| 8 | 1998-11-05 | 19:55 | M8.4 | 19:43:35-19:43:53 | 3.5 ± 0.1 | N22 W18 | 1118/1335 | 06/12:00 | 3 ± 1 | 0.8 ± 0.3 | 3.0 ± 0.3 |
| 9 | 1998-11-22 | 06:42 | X3.7 | 06:39:17-06:39:21 | 2.9 ± 0.1 | S27 W82 | ND | 22/09:00 | 17 ± 6 | 0.8 ± 0.2 | 1.8 ± 0.2 |
| 10 | 1998-11-24 | 02:20 | X1.0 | 02:17:47-02:22:30 | 2.9 ± 0.1 | S30 W81 | 1798/1798 | 24/10:00 | 18 ± 8 | 0.6 ± 0.2 | 1.6 ± 0.1 |
| 11 | 2000-07-14 | 10:24 | X5.7 | 10:20:25-10:22:13 | 3.2 ± 0.1 | N22 W07 | 1775/2061 | 14/18:00 | 45 ± 7 | 0.6 ± 0.3 | 2.2 ± 0.2 |
| 12 | 2000-11-08 | 23:28 | M7.4 | 23:17:51-23:18:49 | 3.6 ± 0.2 | N20 W66 | 1738/ND | 09/15:00 | 40 ± 10 | 0.6 ± 0.2 | 3.0 ± 0.1 |
| 13 | 2000-11-25 | 18:50 | X1.9 | 18:38:02-18:38:23 | 3.7 ± 0.1 | N20 W23 | 671/893 | 26/20:00 | 11 ± 1 | 0.8 ± 0.3 | 2.9 ± 0.2 |
| 14 | 2001-04-10 | 05:26 | X2.3 | 05:19:05-05:19:54 | 3.7 ± 0.2 | S23 W09 | 2411/2940 | 11/01:00 | 6 ± 2 | 0.6 ± 0.2 | 2.8 ± 0.3 |
| 15 | 2001-10-01 | 05:02 | M9.1 | 05:01:11-05:01:27 | 4.2 ± 0.2 | S18 W80 | 1405/1409 | 01/23:00 | 25 ± 7 | 0.7 ± 0.2 | 4.0 ± 0.2 |

4. Выводы. Исходя из сценария переноса ускоренных во вспышке протонов в эруптивном магнитном жгуте, исследованы соотношения между спектрами околоземных протонных возрастаний в 1991–2006 г., с одной стороны, и фотонными индексами жёсткого рентгеновского излучения родительских вспышек и скоростями КВМ, с другой стороны. Суть исследования состояла в раздельном анализе наклонов протонных спектров по обе стороны от энергии излома. Результаты подтверждают, что ускорение на ударной волне статистически преобладает для более низких энергий протонов (примерно < 50 МэВ), а всплещное ускорение – для более высоких (примерно 50–200 МэВ). Отсутствие корреляции между спектральными индексами протонов наивысших энергий в событиях с GLE и фотонными индексами предполагает неясный «эффект охлаждения» в расширяющихся магнитных жгутах, что требует дальнейшего анализа.

Перспективным выглядит подобный анализ последующих событий. Решающими в нашем анализе были строгий отбор наблюдававшихся всплесков и оценка фотонного индекса по наиболее мощному и жёсткому пику ЖР всплеска. Сценарий переноса протонов в магнитном жгуте заслуживает детального исследования.

Литература

- Bhatt N.J., Jain R., Awasthi A.K.: 2013, RRA 13, 978
 Chertok I.M., Grechnev V.V., Meshalkina N.S.: 2009, Astron. Rep. 53, 1059
 Dierckxens M., Tziotziou K., Dalla S. et al.: 2015, Solar Phys 290, 841
 Grechnev V.V., Kiselev V.I., Uralov A.M. et al.: 2017, Solar Phys 292, 102
 Kahler S.W.: 1982, JGR 87, 3439
 Kocharov L., Pohjolainen S., Mishev A. et al.: 2017, ApJ 839, 79
 Lin R.P., Dennis B.R., Hurford G.J. et al.: 2002, Solar Phys 210, 3
 Logachev Yu.I., Bazilevskaia G.A., Vashenyuk E.V. et al.: 2016, Catalogue of solar proton events in the 23rd cycle of solar activity
 Masson S., Antiochos S.K., DeVore C.R.: 2013, APJ 771, 82
 Mewaldt R.A., Cooper M.D., Cohen C.M.S. et al.: 2012, Space Sci. Rev. 171, 97
 Sato J., Matsumoto Y., Yoshimura K. et al.: 2006, Solar Phys 236, 351
 Sladkova A.I., Bazilevskaia G.A., Ishkov V.N. et al.: 1998, Catalogue of solar proton events 1987–1996. Edited by Logachev Yu.I.
 Tripathi S.C., Khan P.A., Aslam A.M. et al.: 2013, APSS 347, 227
 Trotter G., Samwel S., Klein K.-L. et al.: 2015, Solar Phys 290, 819
 Yashiro S., Gopalswamy N., Michalek G. et al.: 2004, JGR 109, A07105
 Yoshimori M., Okudaira K., Hirasima Y. et al.: 1991, Solar Phys 136, 69

Благодарности. Мы признательны К.-Л. Кляйну за его первоначальную идею, развитие которой привело к этому исследованию, А.А. Кочанову за полезные обсуждения, коллективам RHESSI, Yohkoh, SOHO и авторов использованных каталогов. Постановка задачи, статистический анализ и обсуждение результатов выполнены за счёт гранта Российского научного фонда № 21-72-00039 (В.И. Киселёв). Отбор событий, обработка и анализ данных жёсткого рентгеновского излучения (В.В. Гречнев, Н.С. Мешалкина) выполнены при поддержке Минобрнауки России.