

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-20038, <https://rscf.ru/project/25-17-20038/> и гранта Министерства образования и науки Мурманской области

НАБЛЮДЕНИЕ И АНАЛИЗ GLE77

Балабин Ю.В., Германенко А.В, Гвоздевский Б.Б.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Полярный геофизический институт" Российской академии наук, Апатиты, Россия.

GLE77 – первое крупное событие СКЛ 25-м цикле. Предыдущее крупное GLE было отмечено в мае 2012 г, с тех пор регистрировались события GLE малой амплитуды, 2–5%. Произошло новое GLE от вспышки в активной области 4274 с координатами N23W24. В оптическом диапазоне вспышка имела класс 3B, она сопровождалась рентгеновским излучением, максимум которого наблюдался в 10:04 UT, класс вспышки X5.1, и радиовсплеском II типа, начало которого отмечено в 10:01 UT (<https://www.swpc.noaa.gov/products-and-data>). Радиовсплески этого типа указывают на присутствие в короне высокоэнергичных электронов. Самое раннее возрастание (по минутным данным) началось в 10:12 UT на станциях Моусон и Ньюарк. Первая находится в Антарктиде, другая в Канаде. Причем, Ньюарк показал наибольший из всех рост в первую пятиминутку 10:10–10:15 UT: ~15%, тогда как на других НМ возрастание в этот интервал не превысило 5%. Существенно, что в 10:12 UT по минутным данным возрастание отметил НМ в Мехико, пороговая жесткость для которого составляет $R_c = 7.5$ ГВ. В следующий интервал 10:15–10:20 UT целый ряд станций показали резкий рост, доходивший до 40%. Наибольшее среди всех НМ возрастание показал Наин ~150% и Моусон ~133%, в то время как Ньюарк едва достиг 60%. Возрастание амплитудой 5–20% наблюдалось на среднеширотных станциях Иркутск, Юнгфрау, Киль и др. НМ в Мехико и Пекине показали небольшие, но вполне выделяемые возрастания 2–5%. Для Пекина значение $R_c = 8.8$ ГВ. Это указывает на то, что спектр СКЛ на начальной фазе был жестким. На ряде НМ (Апатиты, Южный полюс, Оулу) наблюдалось более одного локального максимума. Присутствие сильной анизотропии СКЛ следует из факта, что возрастания на станциях Апатиты и Оулу, имеющих близкие асимптотические конусы приема, различаются в два раза. На рисунке 1 представлены разнообразные профили в GLE77. Используются пятиминутные данные, приведенные к среднему давлению на станции (nmdb.eu/nest). На рисунке 2 показана карта асимптотических конусов (АК) приема, рассчитанных с использованием модели магнитосферы Цыганенко T-01 для 10:30 UT.

Апатиты зарегистрировали два локальных максимума в течение часа, от начала события до 11 UT, причем, первый максимум больше. Далее Апатиты держат уровень $\sim 20\%$ в течение многих часов. На этот же уровень $\sim 20\%$ выходит еще ряд НМ, причем, некоторые его достигают снизу (как Баренцбург, Терре Адели), а другие сверху (как Моусон, Оулу). Станция Певанук также показала два максимума, первый максимум по времени совпадает со вторым в Апатитах, а второй максимум наступил после 12 UT. Форт Смит имеет растянутый фронт более двух часов, один нечеткий максимум около 13 ч; правильное сказать, темп счета выходит на "плато" и держится примерно постоянным более часа. Станция Дом-Си также находится в Антарктиде, однако, его АК располагается в области питч-углов $\sim 90^\circ$, отчего она не принимала анизотропный поток СКЛ на начальном этапе. Рисунок 1 демонстрирует факт сильной анизотропии. АК Баренцбурга отстоит дальше от оси анизотропии (см. рисунок 2), и его профиль имеет сильно растянутый фронт и позднее начало. У ст. Юнгфрау жесткость обрезания $R_c = 4.4$ ГВ, а у Мехико $R_c = 7.5$ ГВ. Тем не менее Мехико демонстрирует рост до $\sim 5\%$ в первые пятиминутки после начала GLE77, а на Юнгфрау возрастание $\sim 12\%$. Это указывает на наличие в потоке СКЛ частиц с энергиями > 7 ГэВ, что, в свою очередь, означает жесткий спектр у СКЛ. Среднеширотные станции (Москва, Иркутск, Баксан и др.) показывали значимое возрастание вплоть до 13 ч и позже. Карта АК также объясняет самое раннее значительное (15%) возрастание на НМ Ньюарк: средняя и самая эффективная часть его АК располагается ближе всех к оси анизотропии.

Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В. Событие GLE77 11 ноября 2025 г.
// ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ / GEOMAGNETISM AND AERONOMY. 2026. Т. 66.
№ 3. С. 499–514. DOI: 10.7868/S3034502226030038

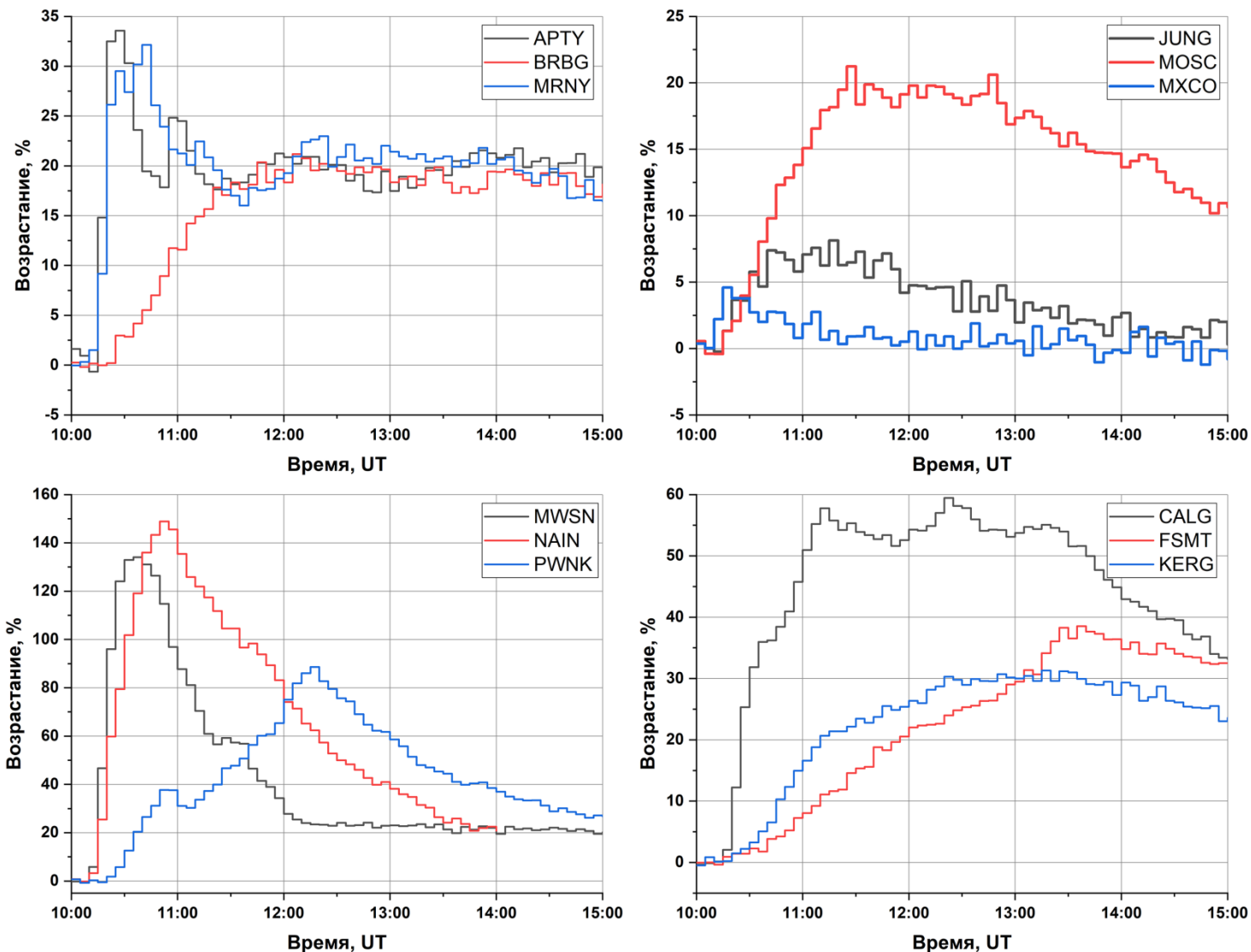


Рисунок 1. Профили ряда станций НМ. АРТУ – Апатиты, BRBG – Баренцбург, CALG – Калгари, FSMT – Форт Смит, PWNK – Певанук, MRNY – Мирный, MOSC – Москва, MWSN – Моусон, NAIN – Наин, JUNG – Юнгфрау, KERG – Кергелен, MXCO – Мехико.

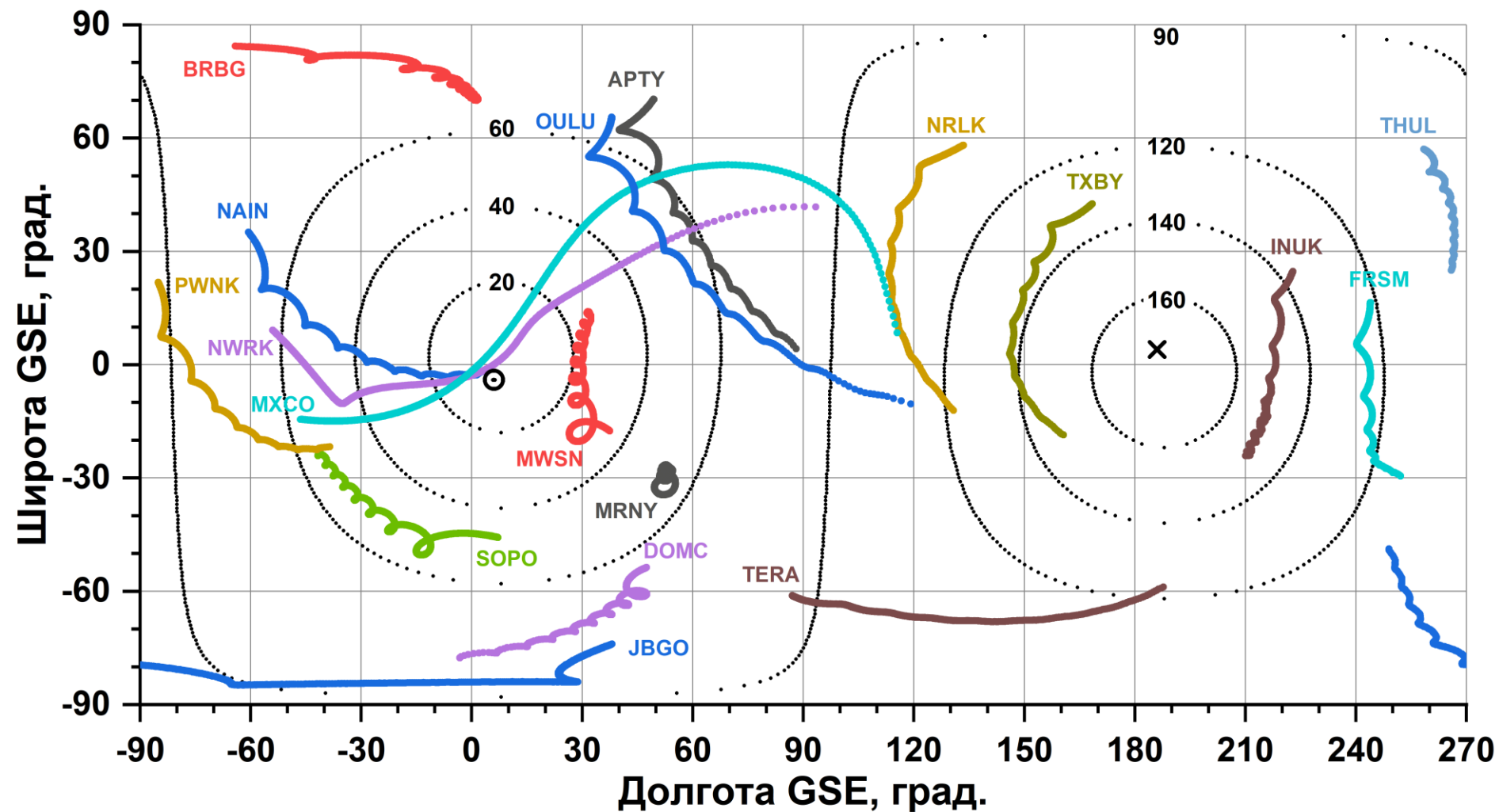
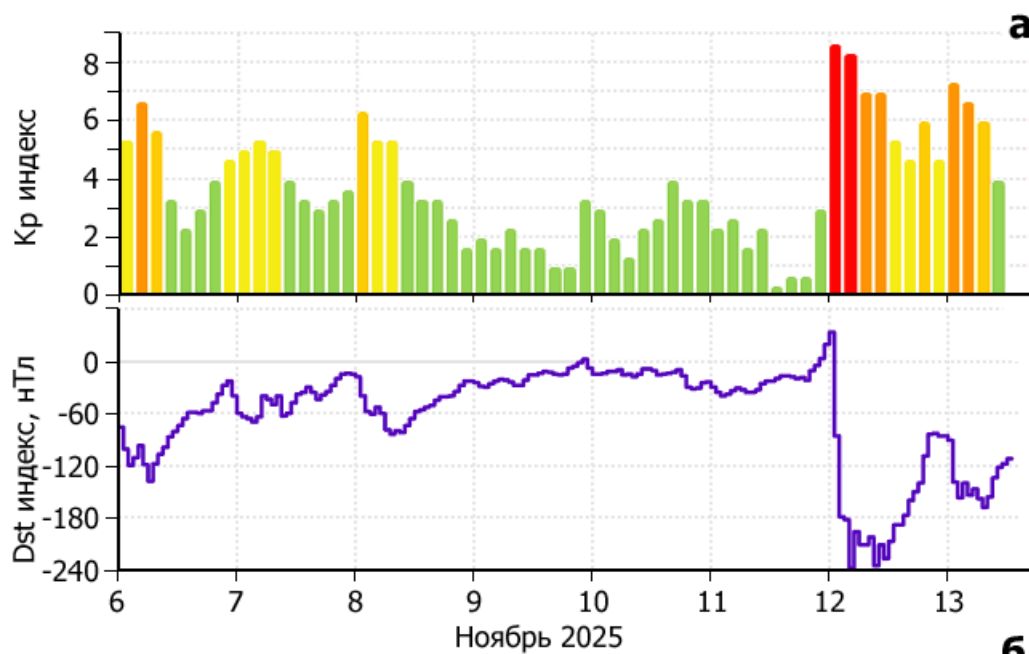


Рисунок 2. Асимптотические конусы (АК) приема ряда станций НМ. Система координат GSE, Модель T-02, 10:30 UT. Символами $\odot$ и $\times$ показано положение вектора ММП. Линии равных питч-углов показаны чёрными точками с числами, показывающими значение данного питч-угла.



6

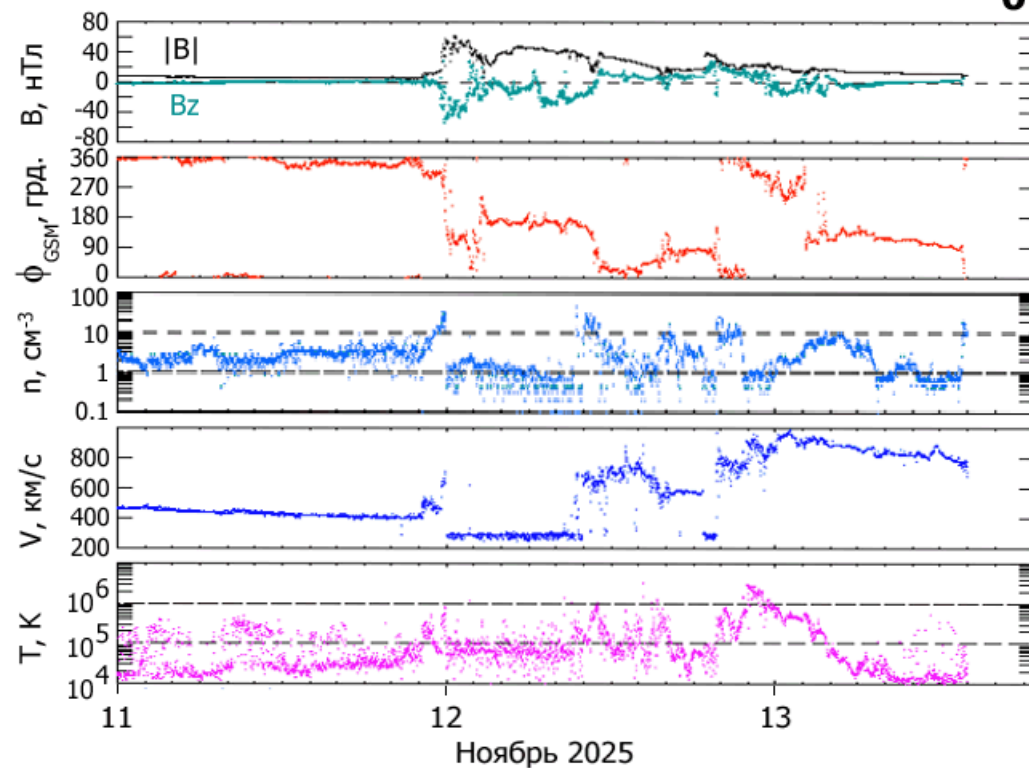


Рисунок 3. Динамика состояния межпланетной среды и геомагнитной обстановки во время GLE77 и последующие сутки $Kp = 2$, $Dst = -35$ нТл. Межпланетная среда также находилась в спокойном состоянии. Скорость солнечного ветра равнялась 440 км/с, давление солнечного ветра составило 0.7 нПа. Напряженность межпланетного магнитного поля (ММП) была чуть больше 5 нТл, при этом компоненты B_y и B_z имели значения почти нулевые, следовательно, вектор ММП лежал вблизи плоскости эклиптики и направлен был к Солнцу.

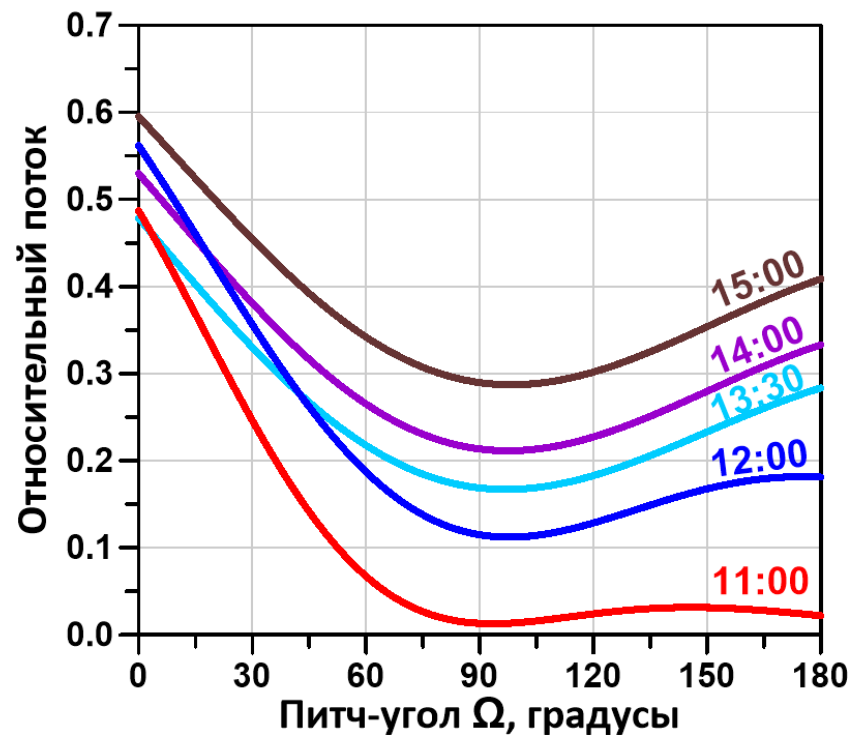
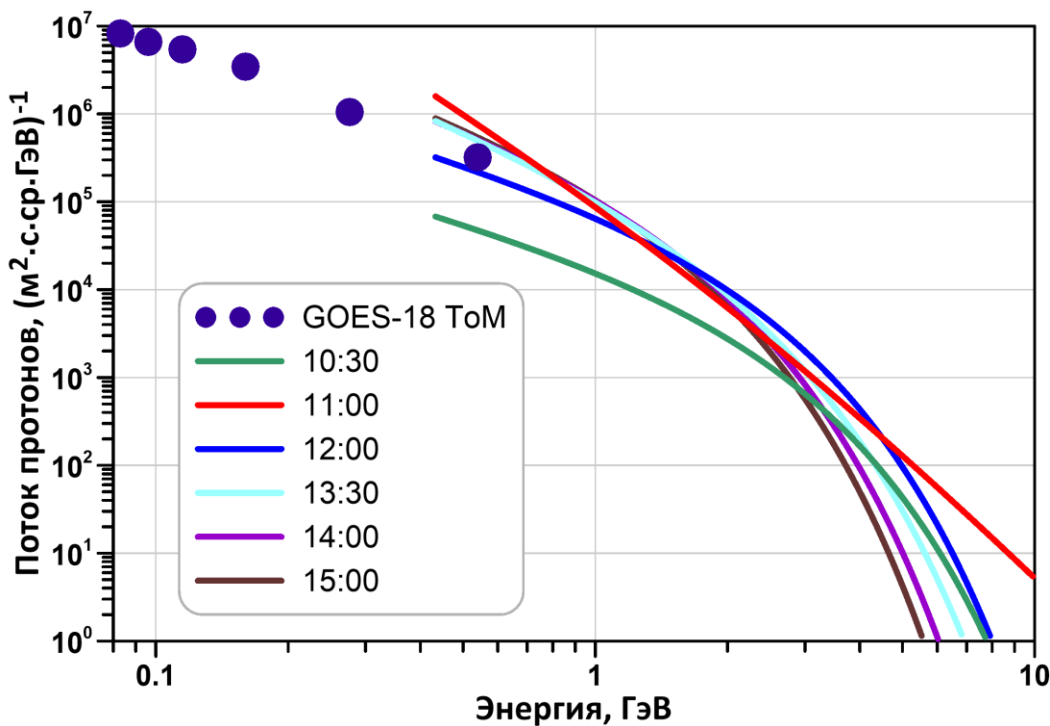


Рисунок 4. Динамика параметров потока СКЛ события GLE77 с 11 UT до 15 UT. Особенность GLE77 в том, что экспоненциальный спектр СКЛ присутствовал от начала GLE77 до 15 UT за исключением периода с 10:50 UT до 11:40 UT, когда спектр стал на небольшое время степенным. При этом экспоненциальный спектр плавно смягчался. $E_0 = 0.74$ ГэВ вначале GLE77 и $E_0 = 0.42$ ГэВ в 15 UT. До появления степенного спектра ПУР имело форму пеленка в углом ~ 40 -50 градусов. Вместе со степенной формой спектра ПУР приобрел линейную форму на углах < 80 градусов и небольшой обратный поток. После 11:40 UT спектр вернулся в экспоненциальной зависимости, а ПУР сохранил линейную зависимость, а обратный поток увеличивался.

Выводы

На основе разработанной методики решения обратной задачи, которая применялась ранее для анализа ряда событий GLE, получен массив параметров спектров СКЛ на протяжении нескольких часов от начала события с шагом 5 мин. Анализ этих параметров показывает, что первый максимум в 10:30 UT вызван потоком с экспоненциальным спектром при характеристической энергии $E_0 = 0.74$ ГэВ и узким питч-угловым распределением. Далее происходит плавный переход к степенной форме спектра с показателем $\gamma = -4.2$. Во время действия спектра со степенной формой наблюдается второй максимум на профилях НМ около 11:00 UT. Эти характеристики спектров на начальной фазе (от начала события до 11 UT) соответствуют жесткому потоку СКЛ. Далее форма спектра снова подвергается трансформации, к 12:00 UT спектр становится экспоненциальным с $E_0 = 0.65$ ГэВ и сохраняет эту форму до конца периода анализа в 15:00 UT, но происходит постепенное умягчение потока; в 15:00 UT $E_0 = 0.40$ ГэВ. Присутствие в СКЛ экспоненциального спектра спустя много часов после начала GLE77, вероятнее всего, связано с особенностями распространения через плотный корональный выброс от предыдущей вспышки. К 12 UT формируется существенный обратный поток, анизотропия СКЛ значительно снижается. Анализ профилей возрастания и расположения асимптотических конусов приема НМ на небесной сфере подтверждает жесткий спектр в событии GLE77. В начале GLE77 в потоке присутствуют частицы с энергиями ~ 10 ГэВ (НМ Мехико, $\sim 5\%$), а спустя час в 11:10 UT и позже во время действия степенного спектра в потоке имеются частицы ~ 5 ГэВ (НМ Юнгфрау, $\sim 7\%$). При этом средняя ошибка решения в начале события составляет 6–8%, после 12 UT она снижается до 2–4%, что указывает на хорошую устойчивость и надежность полученных результатов.