

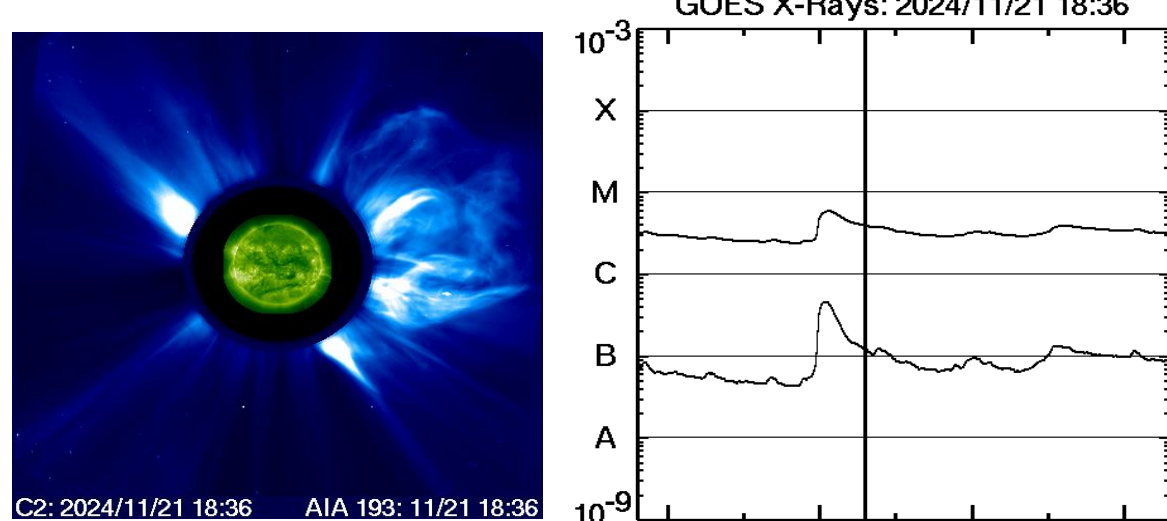
ВОЗРАСТАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ 21 НОЯБРЯ 2024 г. (GLE76): СПЕКТРЫ И АНИЗОТРОПИЯ



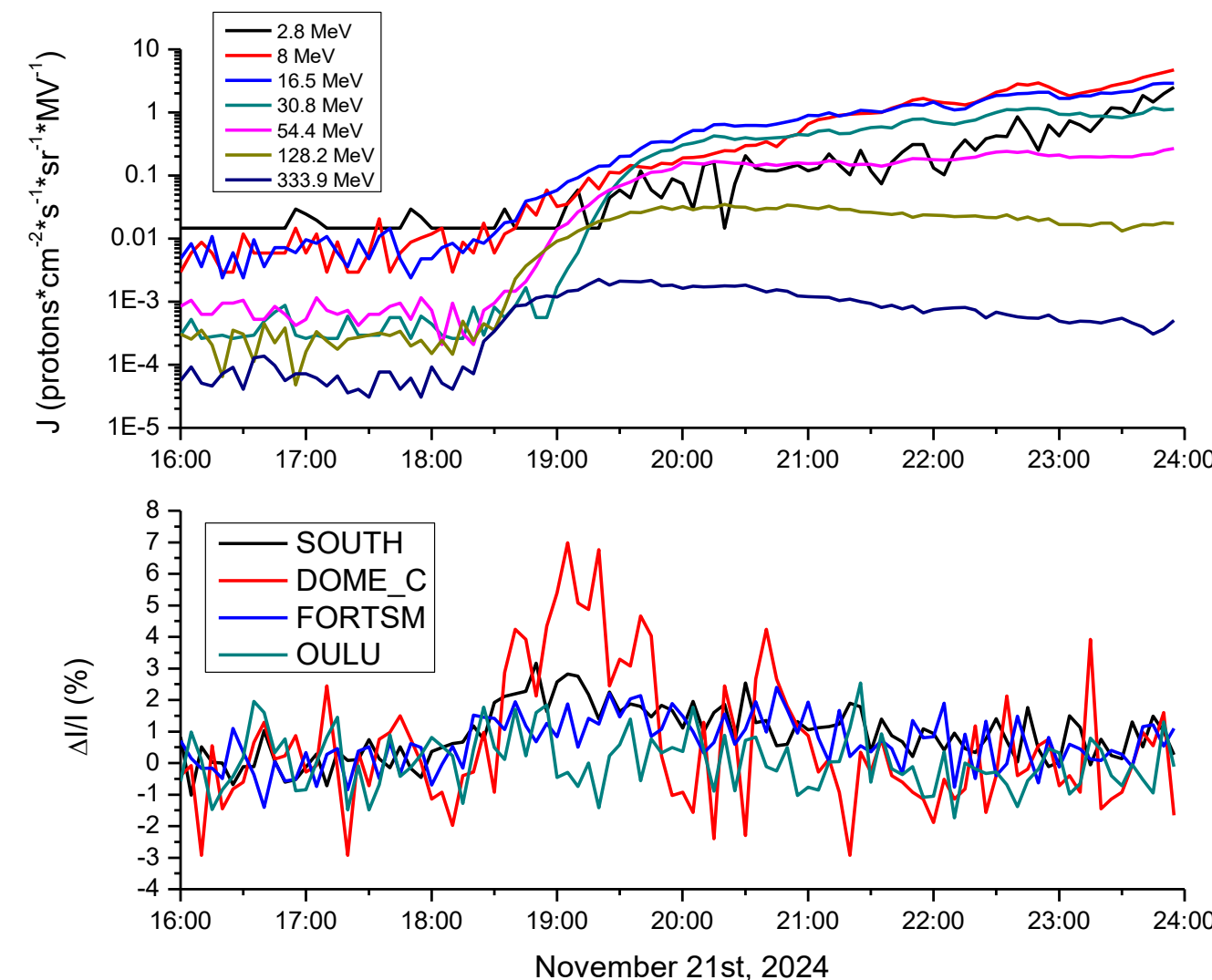
Ковалев И.И. (ivankov@iszf.irk.ru), Кравцова М.В., Олемской С.В., Сдобнов В.Е., ИСЗФ СО РАН, Иркутск

В работе исследованы спектры и пространственное распределение солнечных протонов, зарегистрированных в период наземного возрастания интенсивности космических лучей (КЛ) 21 ноября 2024 г. (GLE76). Расчеты выполнены методом спектрографической глобальной съемки с использованием пятиминутных данных мировой сети станций нейтронных мониторов и данных космического аппарата GOES-16. Получены дифференциальные жесткостные спектры и оценена максимальная жесткость ускоренных в окрестностях Солнца протонов (~ 3 ГВ). Установлено, что во время события преобладает двунаправленная анизотропия КЛ.

Источник: Залимбовая вспышка ($\sim W115-120$). Наиболее значимым свидетельством данного события является гало-KBM (линейная скорость 1436 км/сек), наблюдавшийся на SOHO/LASCO в 18:12 UT 21 ноября 2024 г. KBM сопровождался повышением интенсивности рентгеновского излучения, регистрируемого КА GOES, до уровня M6.1.



Событие: Возрастание интенсивности вторичных КЛ было зарегистрировано на высокоширотных станциях нейтронных мониторов (НМ) начиная с 18:30 UT. Наибольшая амплитуда возрастания интенсивности (7%) наблюдалось на антарктической станции Dome C ($R_c < 0.01$ ГВ, $h = 3233$ м). В 18:45 UT интенсивность протонов с энергией более 100 МэВ, регистрируемая спутниками GOES, превысила порог в 1 pfu.



Данные и метод: Использовались пятиминутные данные 29 НМ [oulu.fi]. Анализ проводился методом спектрографической глобальной съемки (СГС) [1]. Амплитуды модуляции отсчитывались от средней скорости счета на каждом НМ за временной промежуток с 16:00 до 18:00 UT 21 ноября 2024 г.

На основе полученных параметров спектра вариаций и данных наблюдений первичных протонов на КА GOES-16 (дифференциальные потоки протонов с эффективными энергиями 2.7, 8, 16.5, 30.8, 54.4, 128.2 и 334 МэВ, регистрируемые инструментом SGPS [https://data.ngdc.noaa.gov/], были рассчитаны дифференциальные жесткостные спектры первичных КЛ. Использовалось выражение, выведенное в рамках модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями гелиосферы [2]:

$$J(R) = C \frac{(\epsilon^2 - \epsilon_0^2)^{3/2}}{\epsilon[(\epsilon + \Delta\epsilon)^2 - \epsilon_0^2]} \left(\frac{\epsilon + \Delta\epsilon}{T_0 + \epsilon_0} \right)^{-\gamma}, \quad \text{где } \epsilon - \text{ полная энергия частиц с жесткостью } R, \epsilon_0 - \text{ энергия покоя, } T_0 - \text{ кинетическая энергия, при которой интенсивность КЛ соответствующей жесткости равна } C, \gamma - \text{ спектральный индекс галактического спектра КЛ, } \Delta\epsilon - \text{ изменение полной энергии частиц в электромагнитных полях гелиосферы.}$$

Спектры ускоренных протонов получены путем вычитания фонового спектра из спектров в конкретные моменты времени.

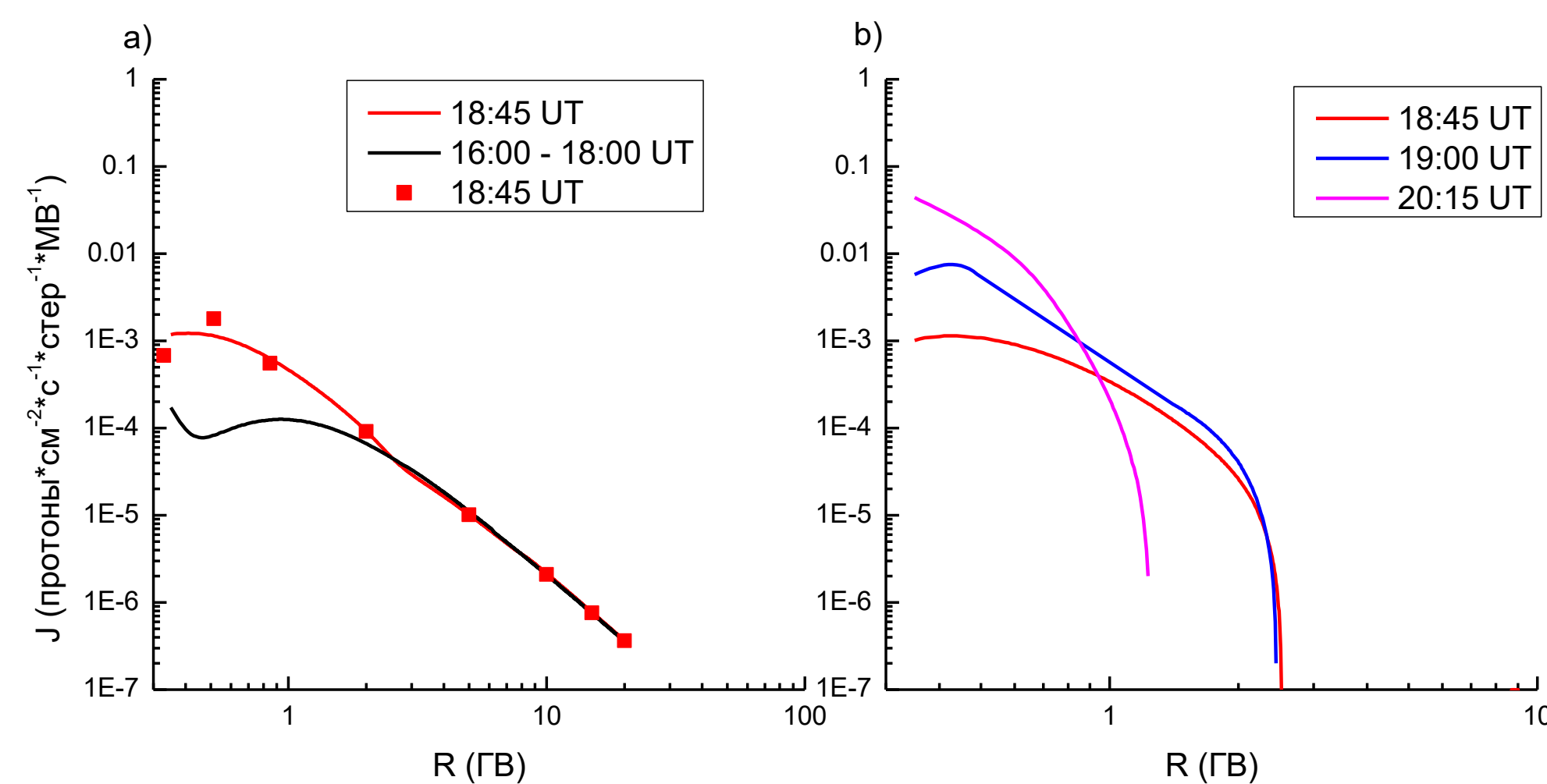


Рис. 1. Дифференциальные жесткостные спектры КЛ: а – средний спектр за два часа до начала GLE (черная линия), спектр в момент GLE76 (красная линия), экспериментальные данные (квадратики); б – ускоренные на Солнце частицы в отдельные моменты времени развития GLE76.

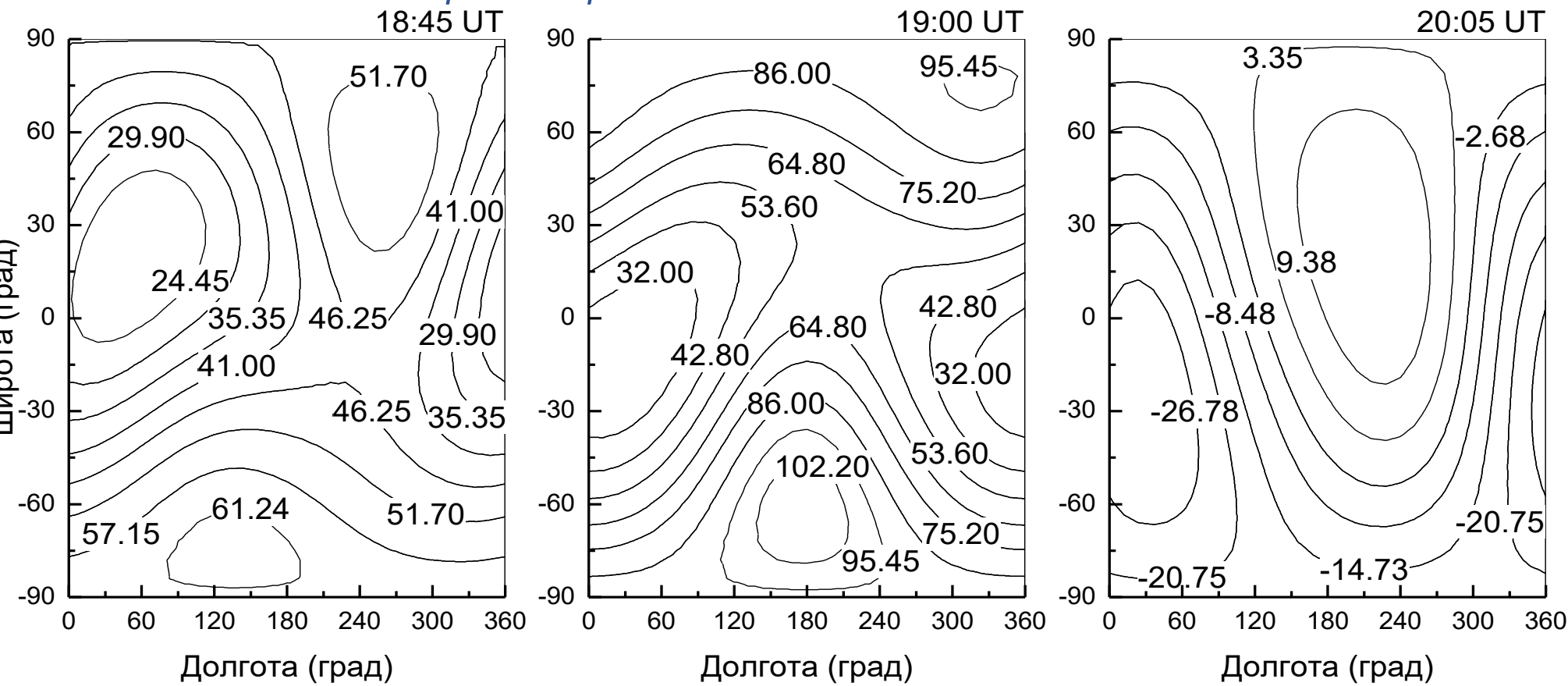


Рис. 2. Пространственное распределение первичных частиц с жесткостью 2 ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат в разные моменты GLE76. Цифрами на кривых указаны уровни относительных интенсивностей первичных КЛ (в %).

Выводы:

- ✓ Получены дифференциальные жесткостные спектры и пространственное распределение первичных частиц на орбите Земли во время GLE76.
- ✓ Максимальная жесткость ускоренных протонов оценена в ~ 3 ГВ.
- ✓ Форма рассчитанных нами дифференциальных жесткостных спектров соответствует виду спектра в рамках теории диффузионного ускорения ударными волнами, образованными KBM.
- ✓ Пространственное распределение первичных КЛ с жесткостью 2 ГВ указывает на наличие двунаправленных потоков частиц, инжектированных в образование типа «магнитная петля».
- ✓ Событие GLE76 не выделяется мощностью или сильной анизотропией, как, например, событие 11 ноября 2025 г. (GLE77). Однако примечательно то, что это наземное возрастание интенсивности КЛ было вызвано вспышкой на обратной стороне Солнца, что подчеркивает важность миссий, позволяющих проводить наблюдения этих областей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО РАН (<https://ckp-rf.ru/catalog/ckp/3056/>)

Вопросы по докладу можно направлять на электронную почту: ivankov@iszf.irk.ru.

Результаты: Используемый вид спектра хорошо описывает наблюдаемую зависимость интенсивности КЛ от их жесткости (см. рис. 1, а). Максимальная жесткость ускоренных протонов определена в ~ 2.5 ГВ (см. рис. 1, б).

На рис. 2 приведено пространственное распределение частиц с жесткостью 2 ГВ. В представленные моменты времени наблюдается двунаправленная анизотропия и повышенные потоки КЛ приходят из направлений (широта (λ), долгота (ψ)): $\lambda = \sim 50^\circ$, $\psi = 260^\circ$ и $\lambda = \sim 75^\circ$, $\psi = 140^\circ$. В рамках используемой модели модуляции КЛ [2] появление второй гармоники в поведении анизотропии свидетельствует о том, что в это время Земля находилась внутри KBM с петлеобразной структурой ММП.

Методом СГС мы уже анализировали слабые наземные возрастания интенсивности КЛ, количественно похожие на GLE76. Например, GLE56 (2 мая 1998 г.), GLE58 (24 августа 1998 г.) [3, 4], и GLE75 (8 июня 2024 г.) [5]. Предельная жесткость ускоренных в окрестностях Солнца частиц для перечисленных GLE определена ~ 3 ГВ (см. рис. 3).

Приведенные на рис. 3 дифференциальные спектры протонов, ускоренных в событиях GLE подобны спектрам в работе [6]. В этой статье С. Таневым приведены рассчитанные на основе теории диффузионного ускорения ударными волнами, которые образованы KBM в нижней короне. А также сформулирован сценарий, согласно которому в диффузионной теории СКЛ ускоряются ударной волной, образованной KBM, на высоком уровне фоновой альфвеновской турбулентности E_{w0} , на расстояниях $1.1-4R_\odot$ от Солнца, после чего модулируются ею до $6-10R_\odot$. Процесс заканчивается интенсивным убеганием частиц в межпланетное пространство.

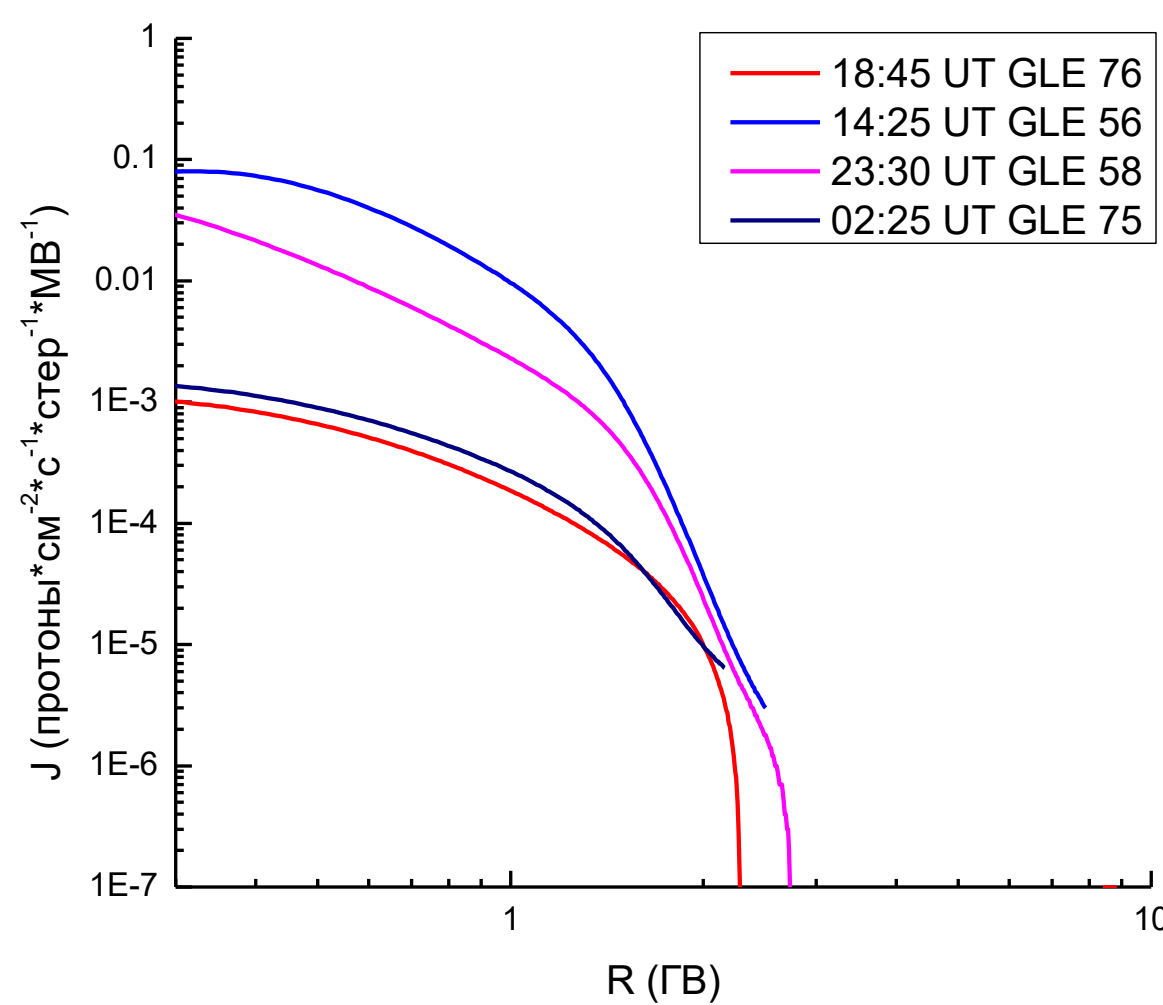


Рис. 3. Спектры ускоренных в окрестностях Солнца частиц в максимуме GLE76 (красная линия), GLE56 (синяя линия), GLE58 (малиновая линия) и GLE75 (темно-синяя линия).

Список литературы:

1. Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. *Solar Phys.* 1998. V. 178 (2). P. 405–422.
2. Дворников В.М и др. *Геомагнетизм и аэрономия.* 2013. Т. 53(4). С. 457–468.
3. Луковникова А.А., Сдобнов В.Е. *Солнечно-земная физика.* 2022. Т. 8(2). С. 29–33.
4. Kravtsova M.V., Sdobnov V.E. *Bull. Rus. Acad. Sci. Phys.* 2023. V. 87(7). P. 1063–1065.
5. Кравцова М.В. и др. *Солнечно-земная физика.* 2026. (в печати).
6. Танев С.Н. *ЖЭТФ.* 2025. Т. 168, Вып. 1 (7). С. 68–87.