

Исследование тяжелых ядер космических лучей твердотельными трековыми детекторами на орбитальных станциях

© Д.Г. Баранов, Ю.Ф. Гагарин, В.А. Дергачев, Е.А. Якубовский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 14 января 1999 г.)

Представлены результаты исследований ядер группы Fe галактических и солнечных космических лучей в интервалах энергии 30–210 MeV/n и 7–210 MeV/n в различных фазах солнечных циклов. С высоким энергетическим разрешением получены спектры частиц Fe в результате экспонирования в течение 1–3 лет камер Платан, собранных из слоев твердотельного трекового детектора (ТТД) — полиэтилентерефталата, на станциях "Салют-6", "Салют-7" и "Мир" с наклоном орбиты к плоскости экватора 51.6° и высотой орбиты 350–400 km. Измерен энергетический спектр частиц Fe от уникального события — серии солнечных вспышек 29 сентября и 19–29 октября 1989 г., которая является наиболее мощной из зарегистрированных и измеренных за всю историю исследования космических лучей. Пользуясь современной моделью проникновения частиц внутрь магнитосферы Земли, разработанной в Институте ядерной физики МГУ, проведено сравнение измеренного спектра с измерениями при помощи ТТД в эксперименте HISS на станции LDEF и с внемагнитосферными измерениями при помощи электронной аппаратуры на спутнике IMP-8 и станции "Galileo". Показано преимущество методики ТТД при получении характеристик энергетического спектра.

Введение

До последнего времени наименее исследованной и наиболее сложной для интерпретации остается в космических лучах (КЛ) область малых энергий тяжелых ядер от десяти до нескольких сотен MeV/n. Это определяется относительно малыми потоками частиц и широким спектром источников ядер: галактических (Г), солнечных (С), аномальных, а при измерениях внутри магнитосферы и захваченных частиц. Вне магнитосферы Земли для галактических ядер измерялся только интегральный поток частиц в этом интервале энергий и отсутствовали энергетические спектры, а энергетические спектры частиц Fe солнечного происхождения были ограничены до конца 1996 г. максимальной энергией 20–30 MeV/n. Между тем измерения энергетических спектров тяжелых ядер внутри магнитосферы в длительных экспозициях на орбитальных станциях методом ТТД позволяет получить новую и более детальную информацию о тяжелых ядрах: форму энергетических спектров ГКЛ, ее изменение в ходе солнечного цикла, определение степени ионизации тяжелых частиц СКЛ. На основании этих данных путем сравнения с измерениями вне магнитосферы, а также внутри магнитосферы при различных наклонениях орбит можно проверить адекватность ряда моделей проникновения частиц внутрь магнитосферы.

Методика

Исследования ТТД в Лаборатории космических лучей ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН начаты около 25 лет назад. В результате, во-первых, разработана технология обработки отечественного ТТД — полиэтилентерефталата, специально предназначенная для регистрации и иденти-

фикации тяжелых ядер с зарядом $Z \geq 20$, останавливающихся в слоях детектора [1,2]. Эта технология включает в себя условия облучения детектора ультрафиолетовым излучением после длительного экспонирования в космическом пространстве с целью восстановления и увеличения чувствительности детектора и условия травления детектора в растворе щелочи с целью выявления треков частиц. Во-вторых, были созданы блоки аппаратуры Платан-1, -2, -3, -4, -5 с геометрическим фактором 0.25–1 m² · sr, с которыми успешно работали экипажи девяти экспедиций при установке, раскрытии и снятии

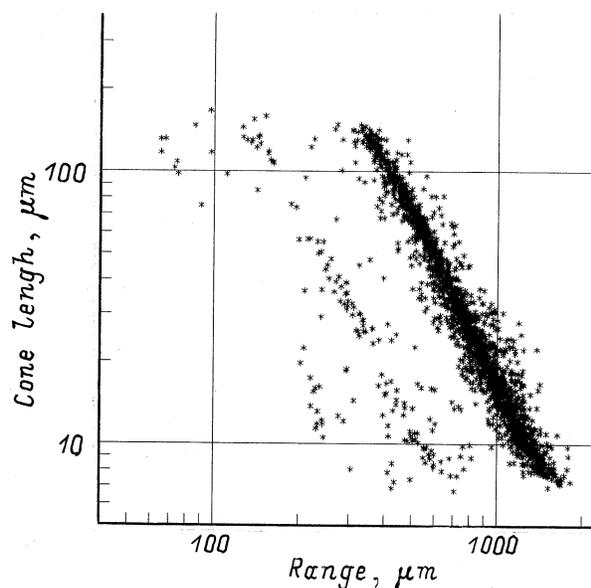


Рис. 1. Зависимость длин конусов треков тяжелых частиц СКЛ в слоях детектора от остаточного пробега.

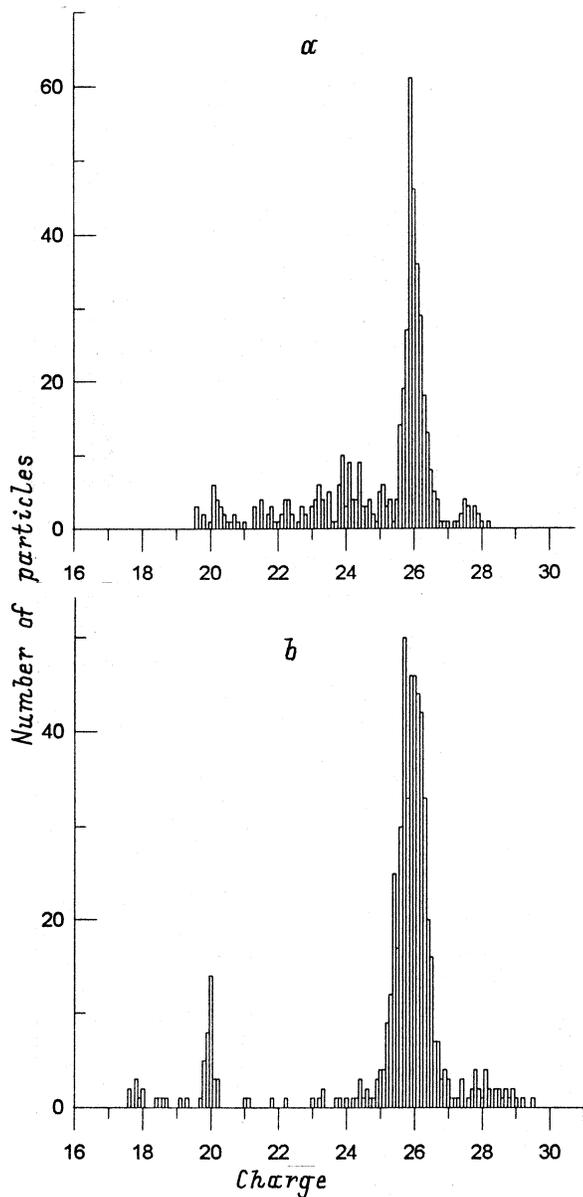


Рис. 2. Измеренные зарядовые распределения тяжелых ядер: *a* — частицы ГКЛ; *b* — частицы СКЛ.

аппаратуры на наружной поверхности орбитальных станций "Салют-6", "Салют-7" и "Мир". Заряд ядер определялся LR-методом по зависимости длин конусов трека L_i , протравленных на верхней и нижней поверхностях слоя детектора, от пробега R_i , отсчитываемого от точки остановки частицы в детекторе. На рис. 1 представлены такие зависимости для частиц СКЛ с зарядом от 18 до 28. Наиболее распространенный элемент — железо выделяется по сгущению точек на диаграмме. Можно видеть, что элементы от Ca до Fe практически отсутствуют. Зарядовые распределения для ГКЛ и СКЛ представлены на рис. 2, *a* [3] и *b* [4] соответственно. Достигнутое зарядовое разрешение для ядер Fe ГКЛ и СКЛ составляет 0.25 и 0.35 единиц заряда, что существенно лучше раз-

решения, полученного в более чувствительных ТТД — CR-детекторе и нитрате целлюлозы 0.45 и 1 ед. зар., и одинаково с разрешением электронного детектора на станции Galileo.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлен впервые измеренный внутри магнитосферы Земли в 1984–1985 г. в эксперименте ПЛАТАН-2 энергетический спектр ядер Fe ГКЛ в интервале энергии 40–210 MeV/п. Наблюдается возрастание потока с увеличением энергии почти на порядок. Увеличение потока с уменьшением энергии в интервале 30–40 MeV/п определяется вкладом частиц Fe солнечных вспышек в апреле и июле 1985 г. Для сравнения на рис. 3 приведен энергетический спектр ядер Fe ГКЛ, измеренный на станции "Voyager" во время максимума интенсивности ГКЛ в 1986–1987 г. на 28 AU (кривая 1), и расчетные кривые 2 и 3 потоков Fe ГКЛ вне магнитосферы Земли для апреля 1985 г. и октября 1984 г. Спектры 2 и 3 получены косвенным путем на основании измеренных спектров гелия и кислорода с учетом относительной распространенности Fe/He и Fe/O. Отметим, что абсолютные потоки частиц, измеренные внутри магнитосферы, в 20 раз меньше, чем на станции "Voyager". Несмотря на большую разницу величин потоков, энергетическое разрешение спектров в нашем эксперименте оказалось сравнимо с данными "Voyager".

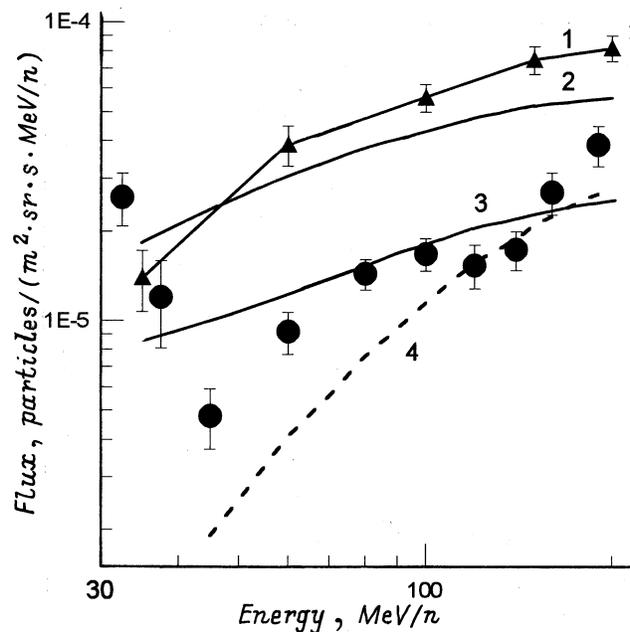


Рис. 3. Энергетический спектр ядер Fe. На орбите станции "Салют-7" в 1984–1985 г. (●), на станции "Voyager" в 1986–1988 г. на 28 AU (▲ и 1), расчет для мая 1985 г. и октября 1984 г. (2 и 3), расчет для орбиты станции "Салют-7" (4). Для 1–3 значения потоков уменьшены в 10 раз.

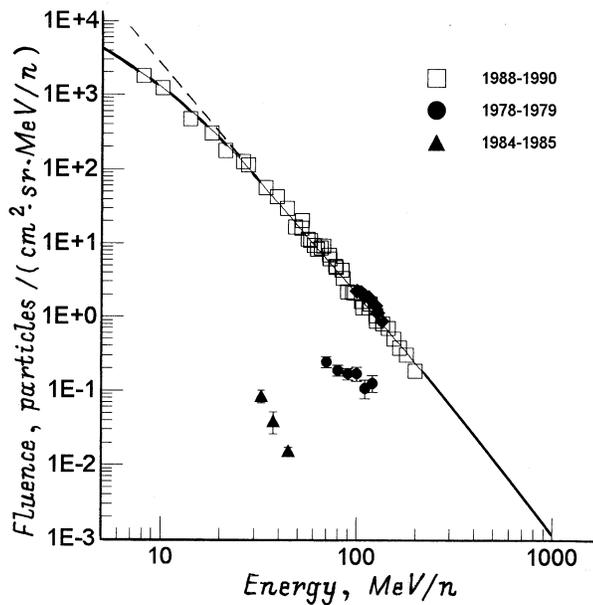


Рис. 4. Энергетические спектры флюенсов частиц Fe СКЛ в трех экспозициях аппаратуры Платан. Сплошная кривая — аппроксимация спектра.

Предварительные результаты измерений потока ядер Fe в камере ПЛАТОН-4 в 1994–1995 гг. вблизи максимума интенсивности ГКЛ свидетельствуют об увеличении почти на порядок потока при энергиях 100–150 MeV/n. Сравнение экспериментального спектра ядер Fe ГКЛ в 1984–1985 гг. с вычислениями ряда авторов (см. ссылки в [5]), находящихся в хорошем согласии друг с другом, показывает, что экспериментальные значения превышают расчетные (рис. 3, кривая 4) в интервале энергий 100–150 MeV/n почти в два раза. Такое различие можно было бы интерпретировать неполной ионизацией частиц Fe ГКЛ малых энергий, вследствие чего их поток внутри магнитосферы ослабляется значительно меньше по сравнению с потоком полностью ионизированных частиц. Однако недавно выполненные расчеты [6] по модели НИИЯФ МГУ, более корректно учитывающей изменение коэффициента пропускания частиц внутрь магнитосферы и средней геомагнитной возмущенности в течение годовой экспозиции в 1984–1985 гг., согласуются с экспериментальными данными. Детальный анализ экспериментальных данных по тяжелым ядрам ГКЛ при энергиях вплоть до нескольких сотен MeV/n показал, что доля неполностью ионизированных тяжелых частиц в ГКЛ при этих энергиях незначительна [7].

В первых трех экспериментах (ПЛАТОН-1, -2, -3) нами наблюдались тяжелые ядра от солнечных вспышек в сентябре 1978 г., в апреле и июле 1985 г. и от серии вспышек в сентябре–октябре 1989 г. (рис. 4).

В камере ПЛАТОН-3 в экспозиции 1988–1990 гг. зарегистрировано уникальное явление: мощные потоки частиц Fe от серии солнечных вспышек 29 сентября–

4 октября и 19–29 октября 1989 г. Потоки частиц по крайней мере на порядок превышают ранее измеренные в подобных событиях. Фон ядер Fe ГКЛ в этой экспозиции практически пренебрежим. Флюенс частиц Fe при максимальной энергии в спектре 200 MeV/n на порядок превышает суммарный двухгодичный фон ядер ГКЛ. При малых энергиях эта разница увеличивается еще на 3 порядка. Для определения ориентации камеры ПЛАТОН-3 в период вспышек относительно потока регистрируемых частиц использовались данные по угловому распределению частиц, попадающих в камеру в полном телесном угле 4π . Рабочая поверхность камеры расположена перпендикулярно продольной оси станции. Обратный поток частиц Fe, проходящий через днище камеры, оказался равным прямому потоку при энергии 100–130 MeV/n (рис. 4), что указывает на изотропный характер облучения в течение серии вспышек.

При построении энергетического спектра в интервале энергий 45–210 MeV/n для определения заряда частиц был использован LR-метод. Для увеличения скорости обработки в интервале энергий 7–130 MeV/n нами был применен экспресс-метод оценки заряда частиц. Этот метод позволяет без проведения детальных измерений отделять частицы с $Z \geq 20$ от более легких частиц с $Z \leq 16$ по числу протравленных насквозь слоев детектора. При построении энергетического спектра частиц Fe из потока частиц с зарядом $Z \geq 20$ вычиталась доля частиц Fe, исходя из измеренного зарядового распределения частиц (рис. 2, b). Полное совпадение спектров частиц Fe в интервале энергий 45–130 MeV/n, полученных двумя различными способами, свидетельствует о надежности и эффективности экспресс-метода для получения спектра частиц Fe СКЛ.

На основании наших измерений в энергетическом спектре частиц Fe при энергии ~ 30 MeV/n обнаружен излом. Спектр в интервале энергий 30–100 MeV/n аппроксимирован прямой (штриховая линия на рис. 4), которая экстраполирована в область меньших энергий. Начиная с энергии 26–30 MeV/n в спектре наблюдается отклонение от прямой. Для частиц с зарядом $Z = 12–16$ излом в спектре (на рис. 4 не приведен) при этой же энергии проявляется более резко. Полученное различие в поведении спектров легких и тяжелых частиц внутри магнитосферы Земли может быть объяснено разной степенью их ионизации: легкие частицы СКЛ почти полностью ионизированы, в то время как частицы Fe имеют заряд $\sim 14–15$. Деформация спектра тяжелых частиц внутри магнитосферы слабее, поскольку эти частицы проникают на орбиту станции в большем диапазоне широт.

Отметим, что для легких частиц СКЛ излом в спектре был замечен ранее, так как спектры легких частиц измерены в большем интервале энергий. Впервые обнаруженный излом в спектре частиц Fe при энергии 30 MeV/n свидетельствует, во-первых, об общей систематике в форме энергетических спектров, не зависящей от заряда частиц, что указывает на единый механизм формирования этих спектров и, во-вторых, о том, что форма

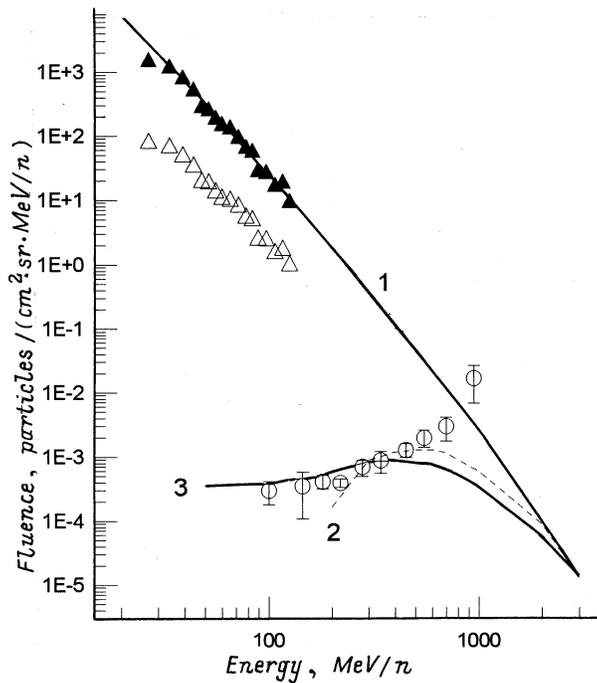


Рис. 5. Энергетические спектры частиц Fe от серии солнечных вспышек в сентябре–октябре 1989 г. Эксперимент Платан (орбита 51.6°) (Δ), эксперимент HIIS (орбита 28°) (\circ), расчетный спектр вне магнитосферы Земли (\blacktriangle), экстраполяция расчетного спектра (1), расчетные спектры внутри магнитосферы Земли при наклонении орбиты 28° (2 и 3).

спектра не зависит от мощности солнечной вспышки. На предварительном этапе исследования с помощью модели НИИЯФ МГУ мы провели сравнение полученного спектра частиц Fe в интервале энергий 30–130 MeV/n со спектром, измеренным ТТД в эксперименте HIIS на станции LDEF при наклоне орбиты 28° [8] (рис. 5). На основе наших экспериментальных данных был восстановлен внемагнитосферный спектр частиц Fe, а затем экстраполирован в область больших энергий (кривая 1 на рис. 5). Учет трансформации этого спектра при проникновении частиц на орбиту с наклонением 28° позволил провести сравнение с результатами измерений на станции LDEF. Расчеты, выполненные для разных модификаций модели (кривые 2 и 3 на рис. 5), удовлетворительно согласуются с данными эксперимента HIIS. Данный анализ позволил оценить степень ионизации частиц Fe СКЛ при энергиях 50 и 500 MeV/n, которая меняется от 14.0 ± 2.6 до 15.7 ± 3.1 . Возможность согласовать данные, полученные в столь различных условиях эксперимента, свидетельствует об адекватности использованной модели.

Не меньший интерес представляет сравнение экспериментальных данных по потокам частиц, полученных внутри магнитосферы и вне ее. К сожалению, вне магнитосферы с помощью электронной аппаратуры измерены потоки частиц Fe только для вспышки 29 сентября–4 октября 1989 г. двумя приборами на спутнике IMP-8 в диапазонах энергий 5–50 и 50–800 MeV/n.

24–27 октября кроме этих двух приборов спектр был измерен также аппаратурой на станции "Galileo" в диапазоне 7–8 MeV/n (рис. 6). Спектр, измеренный в камере ПЛАТАН-3, охватывает диапазон энергий трех указанных электронных приборов, при этом достигнутое энергетическое разрешение в диапазонах 30–80 и 50–210 MeV/n в 4 и в 6 раз выше. На рис. 6 приведен внемагнитосферный спектр, восстановленный по нашим данным. При вычислениях было учтено точное движение станции по орбите в течение солнечных вспышек и изменение геомагнитных возмущений, влияющих на степень деформации измеренных спектров. Полный поток частиц Fe от всей серии вспышек вне магнитосферы был получен при использовании данных IMP-8 и "Galileo" и потоков протонов (данные спутника HEAO, кривые 1–3 на рис. 6). В предположении, что отношение Fe/p для всей серии вспышек в октябре 1989 г. было таким же, как и для события 24 октября, был восстановлен полный поток частиц Fe. Сравнение показателей спектров частиц Fe и протонов на рис. 6 показывает, что для частиц СКЛ отношение Fe/p уменьшается с увеличением энергии. Деформация исходного энергетического спектра частиц Fe СКЛ при прохождении частиц внутрь магнитосферы на орбиту с наклонением 51.6° приводит к уменьшению

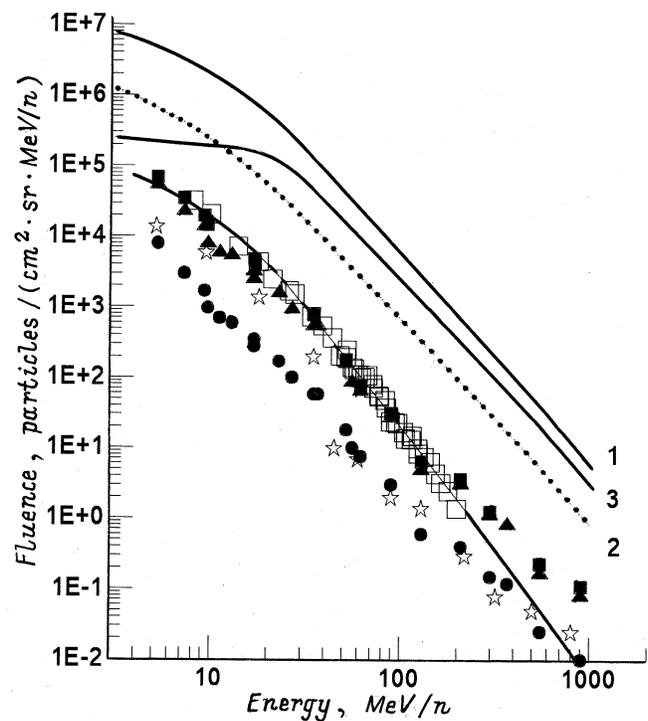


Рис. 6. Энергетические спектры Fe и протонов вне магнитосферы Земли для событий в сентябре–октябре 1989 г. Кривые — флюенсы протонов (умножены в 100 раз): 1 — 19–27 октября, 2 — 24–27 октября, 3 — 29 сентября–6 октября; \square — данные эксперимента Платан-3, пересчитанные во внемагнитосферное пространство, 4 — их аппроксимация; \bullet — событие 24–27 октября; \blacktriangle — сумма событий 19–27 октября; звездочка — сентябрьское событие; \blacksquare — сумма сентябрьского и октябрьского событий.

потока в 15 раз при энергии 8 MeV/n и в 6 раз при энергии 200 MeV/n.

С целью продолжения систематического исследования тяжелых ядер ГКЛ и СКЛ группы Fe и поиска сверхтяжелых ядер малых энергий ГКЛ и СКЛ планируется проведение новых экспериментов с аппаратурой ПЛАТАН на Российской сегменте Международной космической станции.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 94-02-06387 и 96-02-17965).

Список литературы

- [1] Гагарин Ю.Ф., Гордеев И.В., Иванова Н.С. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1983. Т. 47. С. 1844–1847.
- [2] Baranov D.G., Dergachev V.A., Gagarin Yu.F. et al. // Radiation Measurements. 1995. Vol. 25. P. 301–306.
- [3] Baranov D.G., Dergachev V.A., Gagarin Yu.F. et al. // Proc. 24th Intern. Cosmic Ray Conf. Rome, 1995. Vol. 4. P. 1051–1054.
- [4] Баранов Д.Г., Гагарин Ю.Ф., Дергачев В.А. и др. // Тр. конф. "Современные проблемы солнечной цикличности". СПб.: изд-во ГАО, 1997. С. 255–257.
- [5] Баранов Д.Г., Гагарин Ю.Ф., Дергачев В.А. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1995. Т. 35. № 4. С. 144–146.
- [6] Ныммик Р.А. // Докт. дис. М., 1998.
- [7] Gagarin Yu.F., Nymmik R.A., Panasyuk M.I. // Proc. 25th Intern. Cosmic Ray Conf. Durban, 1997. Vol. 3. P. 293–296.
- [8] Gagarin Yu.F., Marennu A.M., Nymmik R.A., Panasyuk M.I. // Adv. Space Res. 1998. Vol. 21. N 12. P. 1699–1702.