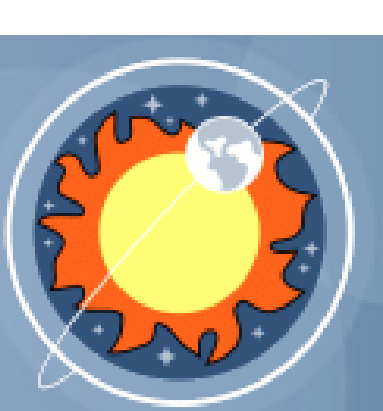


# ФОРБУШ-ЭФФЕКТ И ГЕОМАГНИТНАЯ БУРЯ В АПРЕЛЕ 1990 г.

М.В. Кравцова (Skype - live:d682881c178d042f), С.В. Олемской, В.Е. Сдобнов (E-mail - sdobnov@iszf.irk.ru)

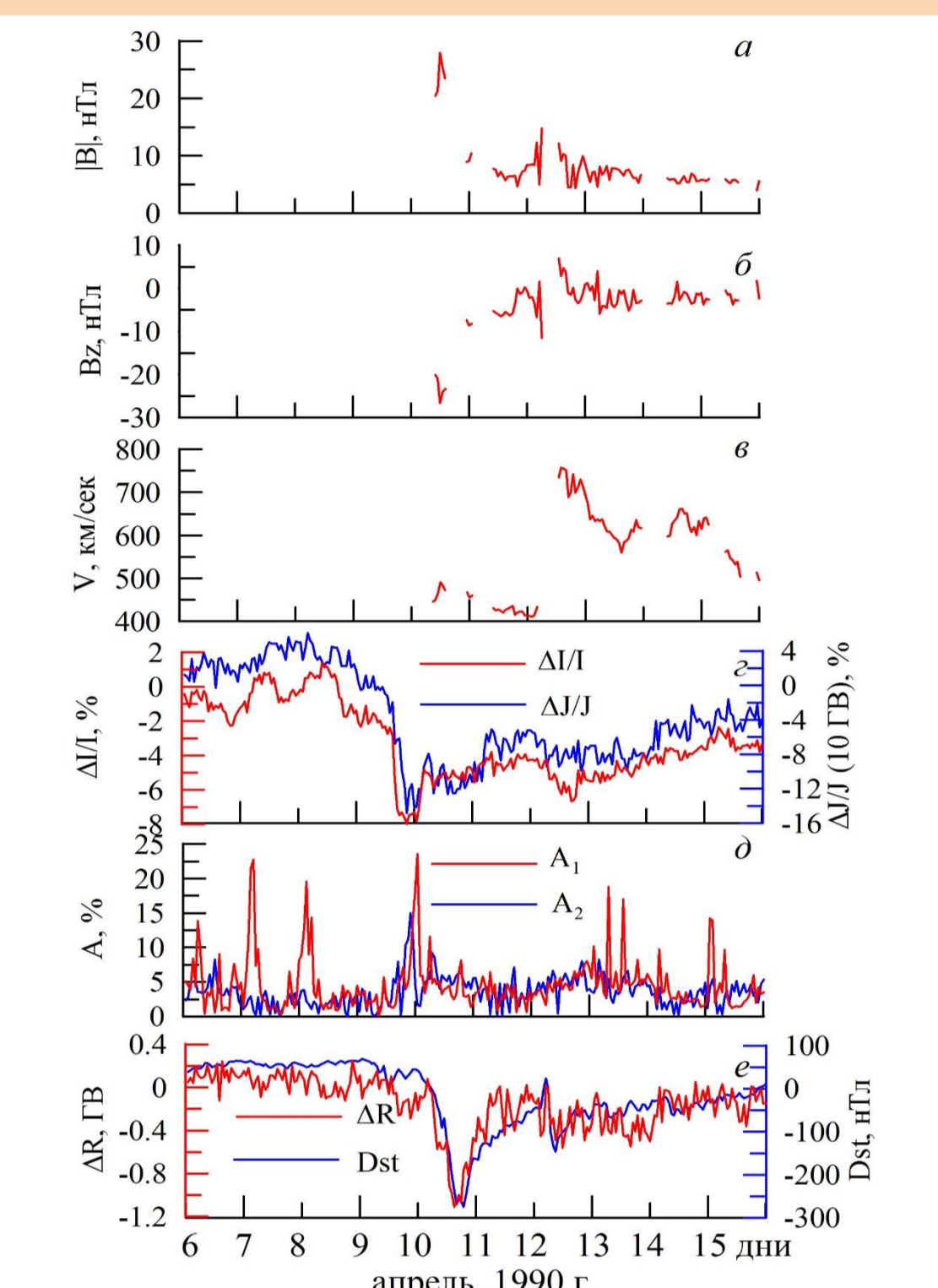
Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской Академии наук, Иркутск



По данным наземных измерений космических лучей на мировой сети станций выполнен анализ Форбуш-эффекта и геомагнитной бури в апреле 1990 г. Рассчитаны спектры вариаций космических лучей, питч-угловая анизотропия космических лучей на разных фазах развития Форбуш-понижения, а также изменения планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания. В рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы Земли, учитывающей токи на магнитопаузе и кольцевой ток, определены расстояние до подсолнечной точки и радиус кольцевого тока, а также вклад кольцевого тока в изменения жесткости геомагнитного обрезания и в *Dst*-индекс во время исследуемых событий.

Как известно Форбуш-эффекты (ФЭ) в космических лучах (КЛ) и геомагнитные бури порождаются крупномасштабными возмущениями в солнечном ветре (СВ). 9 апреля 1990 г. на Земле началась магнитная буря, вызванная приходом ударной волны от солнечной вспышки в активной области 6007 с координатами N24°, E20°. К сожалению, в данный период имеются только отрывочные данные наблюдений межпланетного магнитного поля (ММП), но можно отметить, что скорость СВ на орбите Земли составляла ~ 500 км/с и выше, модуль ММП и его Vz-составляющая в 19:00 UT 10 апреля доходили до ~28 нТл и ~-25 нТл, соответственно. В этот период на мировой сети станций КЛ наблюдался ФЭ. Следует отметить, что максимальное понижение интенсивности КЛ произошло почти на сутки раньше максимальной депрессии геомагнитного поля. Так максимальное понижение скорости счета нейтронного монитора в Иркутске составило ~ -8% в 21:00 UT 9 апреля, а минимальное значение *Dst*-индекса составило -280 нТл 10 апреля 1990 г. в 19:00 UT.

**Данные и метод** Для анализа использовались данные мировой сети станций КЛ (42 нейтронных монитора), исправленные на давление и усредненные за часовые интервалы, а также данные космического аппарата GOES-7 (протоны в семи энергетических интервалах 0.8–4, 4–9, 9–15, 15–40, 40–80, 80–165 и 165–500 МэВ) [1]. Амплитуды модуляции отсчитывались от фонового уровня 8 апреля 1990 г. Выбор спокойного периода обусловлен тем, что в этот период электромагнитная обстановка в межпланетном пространстве и геомагнитная обстановка были спокойными, а спектр галактических КЛ наименее модулирован. Анализ выполнен с применением метода спектрографической глобальной съемки (СГС) [2]. Для расчета спектров КЛ использовалось выражение, полученное в рамках модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями гелиосферы [4]. Используя результаты расчетов методом СГС зависимости изменений жесткости геомагнитного обрезания (ЖГО) от ЖГО по данным мировой сети станций КЛ ( $DR_{\text{об}}$ ) и изменений ЖГО от ЖГО в рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы Земли ( $DR_{\text{кал}}$ ) [5] рассчитаны радиусы кольцевого тока ( $DR$ ) ( $r_c$ ), токов на магнитопаузе ( $DCF$ ) ( $r_m$ ) и вклады этих токовых систем в *Dst*-индекс.



**Рис. 1.** а, б – модуль и Vz-составляющая ММП; в – скорость СВ; г – вариации нейтронной компоненты КЛ на станции Иркутск (красная кривая) и вариации изотропной составляющей интенсивности первичных КЛ с жесткостью 10 ГВ (синяя кривая); д – амплитуды первой A1 (красная кривая) и второй A2 (синяя кривая) гармоник питч-углового распределения КЛ с жесткостью 4 ГВ; е – временной ход изменений жесткости геомагнитного обрезания в Иркутске ( $R_c=3.66$  ГВ) (красная кривая) совместно с *Dst*-индексом (синяя кривая).

**Результаты и их обсуждения** На рис. 1 приведены параметры ММП (модуль напряженности магнитного поля  $|B|$ , его Vz-компонента и скорость СВ  $V$ ), амплитуды вариаций нейтронной компоненты КЛ ( $\Delta I/I$ ) на станции Иркутск ( $R_c=3.66$  ГВ), амплитуды вариаций КЛ с жесткостью 10 ГВ на границе магнитосферы ( $\Delta I/J$ ), амплитуды первой ( $A_1$ ) и второй ( $A_2$ ) гармоник питч-угловой анизотропии для частиц с жесткостью 4 ГВ, а также изменения ЖГО ( $\Delta R$ ) в Иркутске совместно с *Dst*-индексом с 6 по 15 апреля 1990 г. Максимальная амплитуда понижения интенсивности КЛ на станции Иркутск была в 21:00 UT и составила ~ -8% относительно 8 апреля, а амплитуда эффекта в это время для частиц с жесткостью 10 ГВ на границе магнитосферы составила ~ -15%. Максимальное повышение амплитуды первой гармоники питч-угловой анизотропии в рассматриваемом событии составило ~23%, ~20% и ~23% 7 апреля в 05:00 UT, 8 апреля в 03:00 UT и 10 апреля в 01:00 UT, соответственно. Амплитуда второй гармоники питч-угловой анизотропии достигала ~15% 9 апреля в 22:00 UT.

Изменения ЖГО в Иркутске в период магнитной бури, сопровождавшей ФЭ, доходили до ~ -1.1 ГВ. Максимальное понижение ЖГО произошло 10 апреля в 15:00 UT, а максимальное понижение *Dst*-индекса произошло 10 апреля в 19:00 UT. Коэффициент корреляции между изменениями ЖГО в Иркутске и *Dst*-индексом для периода с 6 по 15 апреля 1990 г. составил ~ 0.82. Максимальное понижение интенсивности КЛ на Земле произошло на ~18 ч раньше, чем максимальное понижение ЖГО и на ~22 ч раньше, чем максимальное понижение *Dst*-индекса. Причиной большой разницы начала ФЭ и геомагнитной бури согласно [6, 7] является геометрический фактор пересечения Землей переднего фронта крупномасштабных возмущений СВ.

Спектры вариаций КЛ в период рассматриваемого ФЭ не являются степенными в широкой области жесткостей. Только в диапазоне жесткостей выше ~ 10 ГВ эти спектры близки к степенным. Получены средние значения показателя степени  $\gamma$  на разных стадиях события при аппроксимации жесткостных спектров вариаций степенной функцией от жесткости частиц в диапазоне жесткостей выше 10 ГВ. Спектры вариаций КЛ в моменты максимальной модуляции мягче ( $\gamma=0.93$ ), чем на фазах спада ( $\gamma=0.80$ ), и восстановления ( $\gamma=0.87$ ) интенсивности КЛ.

В рамках модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями гелиосферы [4] сильная питч-угловая анизотропия является отражением структурных особенностей крупномасштабных полей в межпланетном пространстве (таких, например, как магнитные ловушки), обусловленных неоднородностью по гелиодолготе и нестационарностью истечения СВ в источнике, т.е. является индикатором динамических процессов в гелиосфере. Возрастание амплитуд  $A_1$  и  $A_2$  (двунаправленной) гармоник питч-угловой анизотропии КЛ наблюдается при изменениях напряженности ММП. При входе и выходе Земли в структуры подобные корональным выбросам массы (КВМ) наблюдается увеличение амплитуды  $A_1$ , а возрастание амплитуды  $A_2$  указывает на наличие в ММП петлеобразной структуры. Перед началом ФЭ амплитуды первой гармоники питч-угловой анизотропии КЛ наблюдалось в отдельные часы 06:00–08:00 UT, а также перед понижением интенсивности КЛ в конце 9 – начале 10 апреля. Амплитуда  $A_1$  в 01:00 UT 10 апреля достигла ~23%. Амплитуды второй гармоники питч-угловой анизотропии КЛ ( $A_2$ ) достигла ~22% в 22:00 UT 9 апреля, что указывает на пребывание Земли в магнитном поле петлеобразной структуры. В это время повышенный поток частиц наблюдался из направлений с координатами в солнечно-эклиптической геоцентрической системе  $\psi \approx 110^\circ$ ,  $l \approx 20^\circ$  и  $\psi \approx 270^\circ$ ,  $l \approx 20^\circ$ .

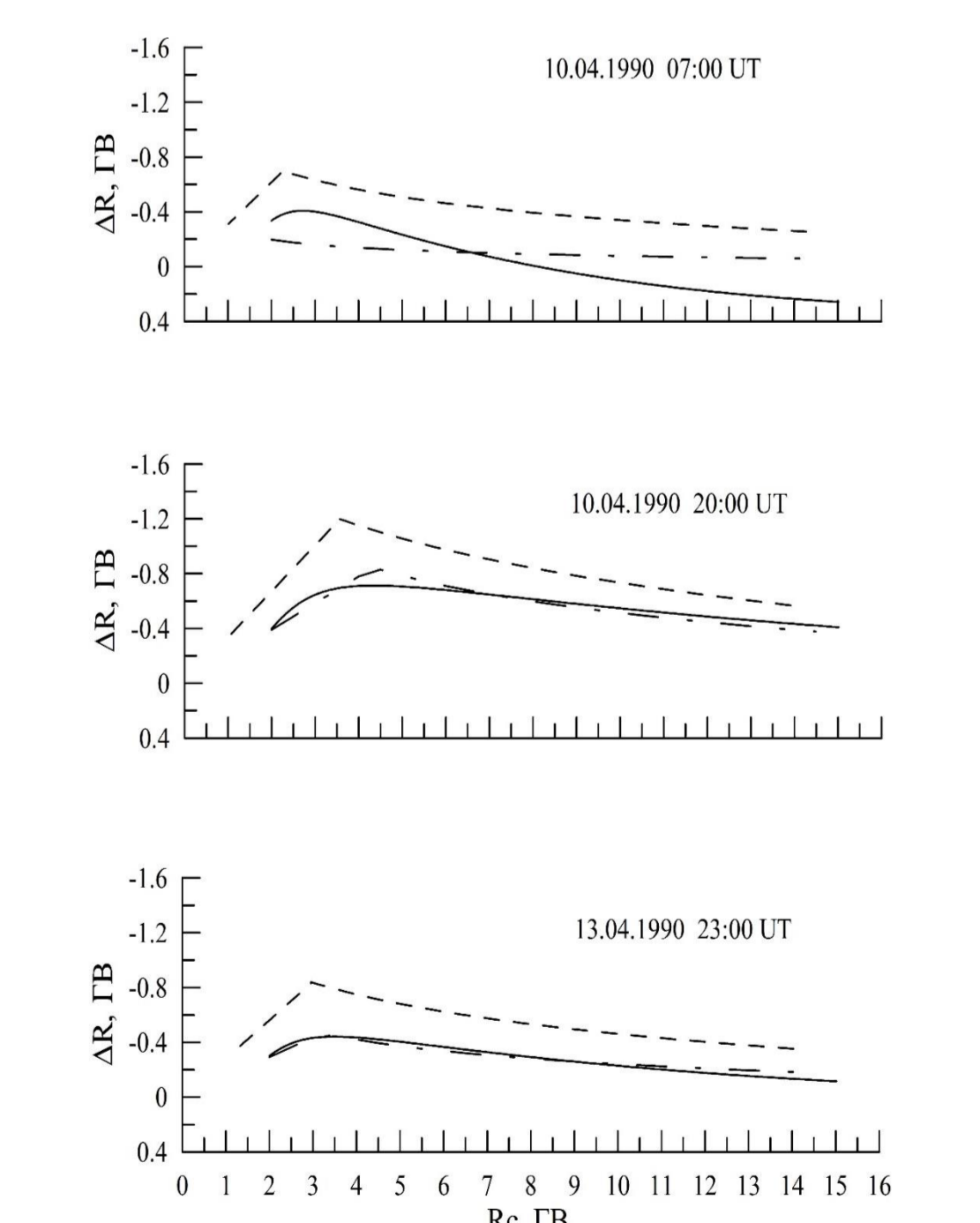
На основе рассчитанных планетарных изменений ЖГО в период магнитной бури в апреле 1990 г. в рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы, учитывающей токи на магнитопаузе и кольцевой ток [5], рассчитано расстояние до подсолнечной точки и радиус кольцевого тока, сила кольцевого тока ( $I_{DR}$ ), тока на магнитопаузе ( $I_{DCF}$ ), а также соотношение между вкладами от этих токов в *Dst*-индекс на разных фазах магнитной бури.

Главная особенность магнитной бури – резкое усиление кольцевого тока вследствие инжекции заряженных частиц из хвоста магнитосферы. Во время магнитной бури наряду с резким усилением кольцевого тока вследствие инжекции заряженных частиц из хвоста магнитосферы происходит значительное усиление и других магнитосферных токовых систем: токов хвоста, токов на магнитопаузе и не учитываемых в нашей модели продольных и ионосферных токов. Соотношение между вкладами этих токовых систем в *Dst*-индекс на разных фазах магнитной бури может характеризовать их относительную динамику во время магнитосферных возмущений.

Поскольку в данной работе для оценки магнитосферных эффектов мы используем простейшую осесимметричную модель ограниченной магнитосферы приводимые нами радиусы кольцевого тока и тока на магнитопаузе отражают суммарные вклады нескольких токовых систем. Поэтому правильнее говорить об эффективных радиусах токовых систем, дающих вклады в *Dst*-индекс подобно кольцевому току и току на магнитопаузе.

На рис. 2 представлены изменения ЖГО в отдельные моменты на разных фазах геомагнитной бури в апреле 1990 г. в зависимости от ЖГО. Видно, что на фазах наиболее интенсивного развития магнитной бури и на фазах ее затухания результаты расчетов изменений ЖГО по данным наблюдений интенсивности КЛ на мировой сети станций хорошо описываются осесимметричной моделью ограниченной магнитосферы [5], включающую только кольцевой ток и токи на магнитопаузе.

В таблице представлены наблюдаемые ( $Dst_{\text{набл}}$ ) и рассчитанные ( $Dst_{\text{расч}}$ ) значения *Dst*-индекса на разные фазы развития магнитной бури, а также вклад кольцевого тока ( $Dst_{DR}$ ) и токов на магнитопаузе ( $Dst_{DCF}$ ) в полную величину *Dst*-индекса и силу тока этих токовых систем. Рассчитанные параметры кольцевого тока и тока на магнитопаузе отражают суммарные вклады нескольких токовых систем. Средние радиусы кольцевого тока в единицах радиуса Земли в составляют для начальной фазы геомагнитной бури 10 апреля 1990 г. в 07:00 UT  $r_c \approx 4.8$ , для главной фазы 10 апреля 1990 г. в 20:00 UT  $r_c \approx 3.8$ , на фазе восстановления 13 апреля 1990 г. в 23:00 UT  $r_c \approx 4.2$ . Среднее расстояние до подсолнечной точки в рамках осесимметричной модели ограниченной магнитосферы для разных фаз развития геомагнитной бури составляет для начальной фазы геомагнитной бури 10 апреля 1990 г. в 07:00 UT  $r_m \approx 8.4$ , для главной фазы 10 апреля 1990 г. в 20:00 UT  $r_m \approx 8.5$ , на фазе восстановления 13 апреля 1990 г. в 23:00 UT  $r_m \approx 8.7$ . Минимальные радиусы кольцевого тока наблюдаются в главной фазе геомагнитной бури с последующим возрастанием на фазе восстановления геомагнитного возмущения. Т.к. в используемой в данной работе осесимметричной модели ограниченной магнитосферы не учитываются вклад многих токовых систем, а рассчитанные значения *Dst*-индекса в некоторые моменты близки к наблюдаемым, можно предположить, что в эти периоды магнитной бури основной вклад в ее интенсивность вносят симметричная составляющая DR и DCF токов.



**Рис. 2** Зависимость изменения ЖГО от ЖГО на разных фазах геомагнитной бури в апреле 1990 г. Сплошная линия – результаты, полученные из данных мировой сети станций КЛ методом СГС, штрих-пунктирная линия – расчет по осесимметричной модели ограниченной магнитосферы с кольцевым током. Штриховая линия – вклад в изменения ЖГО от кольцевого тока, полученного по осесимметричной модели ограниченной магнитосферы.

**Таблица.** Вклад DR и DCF токов в развитии магнитных бурь в апреле 1990 г. на разных стадиях эффекта.

| Дата                | $Dst_{\text{набл}}$ , нТл | $Dst_{\text{расч}}$ , нТл | $Dst_{DR}$ , нТл | $Dst_{DCF}$ , нТл | $I_{DR} \times 10^6$ А | $I_{DCF} \times 10^6$ А |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|-------------------|------------------------|-------------------------|
| 10.04.1990 07:00 UT | -65                       | -38                       | -171             | 133               | 14.9                   | 4.9                     |
| 10.04.1990 20:00 UT | -257                      | -254                      | -386             | 132               | 15.4                   | 3.1                     |
| 13.04.1990 23:00 UT | -93                       | -118                      | -236             | 118               | 13.5                   | 3.1                     |

## Выводы

- Спектры вариаций КЛ в период ФЭ в апреле 1990 г. не являются степенными в широкой области жесткостей, только выше ~ 10 ГВ эти спектры близки к степенным по жесткости.
- При аппроксимации спектров вариаций в период ФЭ в апреле 1990 г. степенной функцией от жесткости частиц при жесткости более 10 ГВ на фазе максимальной модуляции интенсивности КЛ наибольший показатель спектра.
- В период повышенной амплитуды двунаправленной питч-угловой анизотропии КЛ в апреле 1990 г. Земля находилась в петлеобразной структуре ММП.
- Показана возможность по данным наземных измерений КЛ на мировой сети станций проводить количественную оценку радиуса и силу кольцевого тока, а также расстояние до подсолнечной точки и силу тока на магнитопаузе в периоды геомагнитных возмущений.

Работа выполнена в рамках базового финансирования Министерства науки и высшего образования Российской Федерации программы Фундаментальных научных исследований П.16 (№ 0344-2019-0024). Результаты получены на оборудовании Центра коллективного пользования «Ангара» <http://ckp-ru.ru/ckp/3056/> и Уникальной научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей (Сеть СКЛ)».

## Список литературы

1. [http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new\\_avg/](http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg/)
2. Richardson I.G., Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Cane H.V. // JGR. 2000. V.105, N A. P. 12579–12591.
3. Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. // Известия РАН. Серия физ. 2017. Т. 81, № 2. С. 203–206.
4. V.M. Dvornikov, M.V. Kravtsova, V.E. Sdobnov. // Geomagnetism and Aeronomy. 2013. V. 53, N 4. P. 430.
5. Кичигин Г.Н., Сдобнов В.Е. // Геоматетизм и аэрономия. 2017. Т. 57, № 2. С. 1–5.
6. Шадрин Л.П., Мамрукова В.П., Плотников И.Я. // Геоматетизм и аэрономия. 1996. Т. 36, № 3. С. 169–172.
7. Shadrina L.P., Starodubtsev S.A., Plotnikov I.Ya. // International Journal of Geomagnetism and Aeronomy. 2001. V. 2, N 3. P. 1–6.