

УДК 524.1.550.3

КАРТИРОВАНИЕ ЖЕСТКОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВО ВРЕМЯ ГЛАВНОЙ ФАЗЫ МАГНИТНОЙ БУРИ 20 НОЯБРЯ 2003 г.

© 2019 г. О. А. Данилова¹, И. М. Демина¹, Н. Г. Птицына^{1, *}, М. И. Тясто¹

¹Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн (СПбФ ИЗМИРАН), г. Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: nataliaptitsyna@ya.ru

Поступила в редакцию 04.06.2018 г.

После доработки 22.06.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

В работе рассчитаны жесткости геомагнитного обрезания в модельном магнитосферном поле по мировой широтно-долготной сетке $5^\circ \times 15^\circ$ во время главной фазы магнитной бури 20 ноября 2003 г. В максимуме геомагнитной бури в 20:00 UT на средних и в низких широтах наблюдается понижение геомагнитных порогов (ΔR) по сравнению с пороговыми значениями в главном поле на величину до 1.8 ГВ. В экваториальной части ΔR составляет 0.5–0.6 ГВ. Получено, что глобальное распределение падений жесткостей обрезания демонстрирует северо-южную асимметрию, а также асимметрию день–ночь. Это выражается в том, что в дневном секторе в северном полушарии максимум ΔR наблюдается на широте $\sim 40^\circ$ N, а в южном — на широте $\sim 60^\circ$ S. В ночном секторе в северном полушарии максимум ΔR , наоборот, наблюдается на широте $\sim 55^\circ$ N, а в южном полушарии — на широте $\sim 45^\circ$ S. Кроме того, в северном полушарии максимальные значения ΔR в дневном секторе выше, чем в ночном, а в южном полушарии максимальные ΔR в дневном секторе ниже, чем в ночном. Наблюдаемые магнитосферные эффекты в глобальном распределении ΔR , по-видимому, обусловлены доминирующим влиянием частичного кольцевого тока, развивающегося в главной фазе бури.

DOI: 10.1134/S0016794019020056

1. ВВЕДЕНИЕ

Важным фактором космической погоды являются потоки космических лучей (КЛ), которые проникают в магнитосферу и атмосферу Земли из межпланетного пространства. Геомагнитное поле разрешает или запрещает приход частиц КЛ в данную точку в магнитосфере в зависимости от их энергии. Жесткость геомагнитного обрезания (ЖГО), по определению, это пороговая жесткость, ниже которой поток частиц равен нулю из-за геомагнитного экранирования. Данная жесткость обрезания соответствует определенной точке геомагнитного поля. Еще в 1960-х гг. было получено, что космические лучи могут проникать на более низкие широты, чем получается по расчетам с использованием простой дипольной модели магнитного поля Земли [Lanzerotti, 1968; Fillius, 1968; Paulikas and Blake, 1969]. Добавка более высоких гармоник в сферическом разложении главного магнитного поля Земли уменьшает экранирование космических частиц геомагнитным полем (см., например, [Kress et al., 2015]). Кроме внутреннего магнитного поля космические лучи подвергаются воздействию внешнего

магнитного поля магнитосферы. Учет дополнительно токовых систем в магнитосфере еще больше уменьшает экранирование заряженных частиц, приходящих из космического пространства. Во время геомагнитных бурь токовые системы магнитосферы становятся чрезвычайно интенсивными. Это приводит к перераспределению потоков заряженных частиц в магнитосфере, в том числе потоков, достигающих границы атмосферы и поверхности Земли, и к значительному снижению геомагнитных порогов, что открывает доступ к Земле дополнительного потока частиц.

Обычно геомагнитные пороги определяют методом прослеживания траекторий заряженных частиц в магнитном поле магнитосферы, описываемом какой-либо выбранной моделью [McCracken, 1962; Shea et al., 1965; Dorman et al., 1972]. В последние десятилетия кроме чисто аналитических моделей магнитосферного магнитного поля был разработан ряд эмпирических моделей, построенных по данным магнитных измерений на космических аппаратах, в частности модели Ts01, Ts04 [Tsyganenko, 2002a, 2002b; Tsyganenko et al., 2003; Tsyganenko and Sitnov, 2005]. Привлекательность этих моделей состоит в том, что, с одной

стороны, они базируются на данных непосредственных измерений магнитного поля на спутниках, с другой – на современных представлениях об основных внешних источниках магнитного поля магнитосферы. Важной особенностью моделей [Tsyganenko, 2002a, 2002b; Tsyganenko et al., 2003; Tsyganenko and Sitnov, 2005] является то, что они достаточно хорошо описывают магнитное поле в магнитосфере во время возмущений.

События октября–ноября 2003 г. характеризовались рядом экстремальных значений параметров как на Солнце, так и в магнитосфере Земли и поэтому привлекли внимание многих авторов (см., например, [Веселовский и др., 2004] и ссылки там). Магнитная буря, которая произошла в конце этого периода, 18–24 ноября 2003 г., характеризовалась необычайно высокой геомагнитной активностью на высоких, средних и низких широтах. Во время этого события наблюдались не только среднеширотные, но и низкоширотные полярные сияния, которые являются очень редкими событиями; красные сияния наблюдались по всему земному шару, в Калифорнии и Флориде, в Греции и на Канарских о-вах, а также в Южной Сибири [Веселовский и др., 2004; Wojanowska, 2005; Vazquez and Vaquero, 2010; Михалев, 2013]. Исследованию динамики ЖГО во время этой бури посвящен ряд работ [Belov et al., 2005; Ермолаев и др., 2005; Тясто и др., 2008; Дворников и Сдобнов, 2009; Tyasto et al., 2013]. Однако глобальное распределение ЖГО в планетарном масштабе во время этого выдающегося события до настоящего времени не было получено. Вычисление карт ЖГО по мировой сетке достаточно трудоемко, оно требует прослеживания миллионов траекторий частиц. Однако такое глобальное картирование ЖГО актуально при моделировании потоков солнечных и галактических космических лучей во внутренней магнитосфере и верхней атмосфере для различных приложений космической погоды [Kudela et al., 2000; Smart and Shea, 2003; Smart et al., 2006; Kress et al., 2010, 2015]. С этой точки зрения особый интерес представляет изучение влияния токовых систем в магнитосфере, развивающихся во время сильных возмущений в межпланетной среде и магнитосфере, на глобальное долготно-широтное распределение ЖГО.

Целью работы является выявление особенностей перераспределения геомагнитных порогов по земной поверхности за счет влияния внешних источников магнитного поля магнитосферы во время магнитной бури 20 ноября 2003 г. на основе расчетов ЖГО по мировой сетке в модельном поле Ts01.

2. МЕТОД

Геомагнитные пороги были получены методом численного интегрирования траекторий заряженных частиц в модельном магнитном поле Земли. В нашей статье расчеты геомагнитных порогов проведены на 20:00 UT, 20 ноября 2003 г., когда индекс $Dst = -422$ нТл достиг минимума. Этот момент был выбран потому, что в это время наблюдалось максимальное снижение порогов для исследуемой бури на большинстве станций сети нейтронных мониторов [Belov et al., 2005; Тясто и др., 2008]. Плотность и скорость потока солнечного ветра в это время составила соответственно $N = 16.7$ см⁻³, $V = 553$ км/с, компонента межпланетного магнитного поля $B_z = -17.2$ нТл.

Данные о параметрах солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного (ММП) поля взяты на сайте [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>].

Магнитное поле было представлено эмпирической моделью магнитосферного магнитного поля Цыганенко Ts01 (называемая также Ц03) [Tsyganenko, 2002a, 2002b; Tsyganenko et al., 2003], разработанной для возмущенных условий. Для описания сильных бурь была разработана также модель Ts04 [Tsyganenko and Sitnov, 2005]. Однако, наш анализ, проведенный в публикациях [Тясто и др., 2008; Tyasto et al., 2012, 2013], показал, что модель Ts01 лучше описывает магнитосферные возмущения во время больших бурь в ноябре 2003 и 2004 гг. Этот вывод базируется на сравнении ЖГО, полученных в моделях Ts01 и Ts04, с экспериментальными ЖГО, рассчитанными спектрографическим методом [Дворников и Сдобнов, 1991; Dvornikov and Sdobnov, 2002] по данным регистрации интенсивности КЛ мировой сетью нейтронных мониторов (38 станций). Как показано в работах [Тясто и др., 2008; Tyasto et al., 2012, 2013], временные вариации жесткостей обреза, рассчитанные по модели Ts01, на ряде станций имеют высокую корреляцию с Dst -вариацией и, в общем, более чувствительны к изменениям межпланетных параметров, чем рассчитанные по модели Ts04. При этом коэффициенты корреляции с экспериментальными ЖГО для модели Ts01 получаются выше, чем для модели Ts04.

Магнитосферные модель Ts01 построена по базе данных измерений магнитного поля на спутниках в период 37 геомагнитных бурь с $Dst \leq -65$ нТл [Tsyganenko, 2002a, b; Tsyganenko et al., 2003]. В модели Ts01 авторы уделили основное внимание описанию магнитосферы при определенных условиях в солнечном ветре и межпланетном магнитном поле. Основными источниками магнитного поля модели являются: симметричный и частичный круговые токи, система токов хвоста магнитосферы, продольные токи Биркеланда регионов 1 и 2, токи на магнитопаузе. Чтобы ограничить поле внутри магнитосферы, был включен

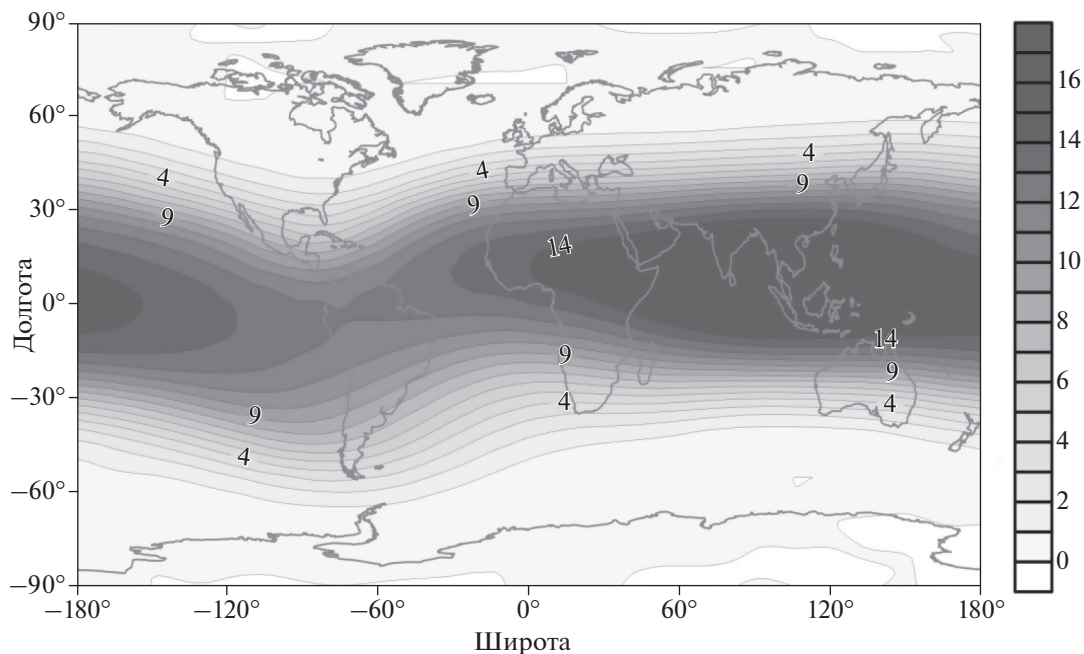


Рис. 1. Изолинии вертикальной жесткости обрезания КЛ в модельном поле магнитосферы Ts01 с учетом внешних и внутренних источников (20 ноября 2003 г. в 20:00 UT). Шкала справа показывает различные уровни ЖГО в единицах ГВ.

блок, описывающий поле взаимодействия, которое представляет собой эффект проникновения межпланетного магнитного поля внутрь магнитосферы. Поле взаимодействия представлено в виде однородного магнитного поля, которое пропорционально поперечной компоненте и направлено вдоль нее. В качестве входных параметров, определяющих влияние межпланетных условий на магнитосферу, используются Dst -вариация, плотность и скорость СВ, а также компоненты ММП.

Для расчетов магнитного поля от внутренних источников использовалось представление главного магнитного поля Земли (ГМПЗ) в виде разложения в ряд по сферическим гармоническим функциям. В качестве коэффициентов ряда использована общепринятая модель IGRF12, утвержденная Международной ассоциацией геомагнетизма и аэронавтики (IAGA) и доступная на сайте IAGA. Поскольку коэффициенты IGRF построены с интервалом в 5 лет, для расчета восточной (X) компоненты ГМПЗ на момент максимума бури 20 ноября 2003 г. значения коэффициентов были интерполированы линейно.

Для построения карт получены геомагнитные пороги на высоте 20 км над поверхностью Земли по широтно-долготной сетке $5^\circ \times 15^\circ$ (мировая сетка).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов геомагнитных порогов по мировой сетке в модельном поле Ts01 в 20:00 UT 20 ноября 2003 г., представлены на рисунках 1 и 2. На рисунке 1 представлено глобальное распределение порогов с учетом внешних и внутренних источников. На рисунке 2 показаны жесткости обрезания, полученные в поле только внутренних источников, т.е. в главном магнитном поле Земли. Шкала различных уровней полученных жесткостей обрезания в единицах ГВ также показана на рисунках. Для того чтобы оценить вклад внешних источников в вариации ЖГО, мы рассчитали ΔR как разность между геомагнитными порогами в магнитном поле модели Ts01, учитывающей как внутренние, так и внешние источники, и геомагнитными порогами в главном магнитном поле. Изолинии ΔR представлены на рис. 3. Шкала ΔR в единицах ГВ также показана на рисунке. Локальный полдень приходится на $120^\circ W$, он отмечен стрелкой на оси абсцисс.

На рисунке 3 видно, что жесткости обрезания во время максимума бури уменьшаются больше всего в области средних и низких широт. Это падение доходит до 1.8 ГВ в области широт 40° – 50° в северном полушарии в вечернем секторе. В экваториальной части пороги снижаются не более чем на 0.5–0.6 ГВ.

Глобальная карта, показанная на рис. 3, демонстрирует довольно сложную картину распределения понижений геомагнитных порогов во

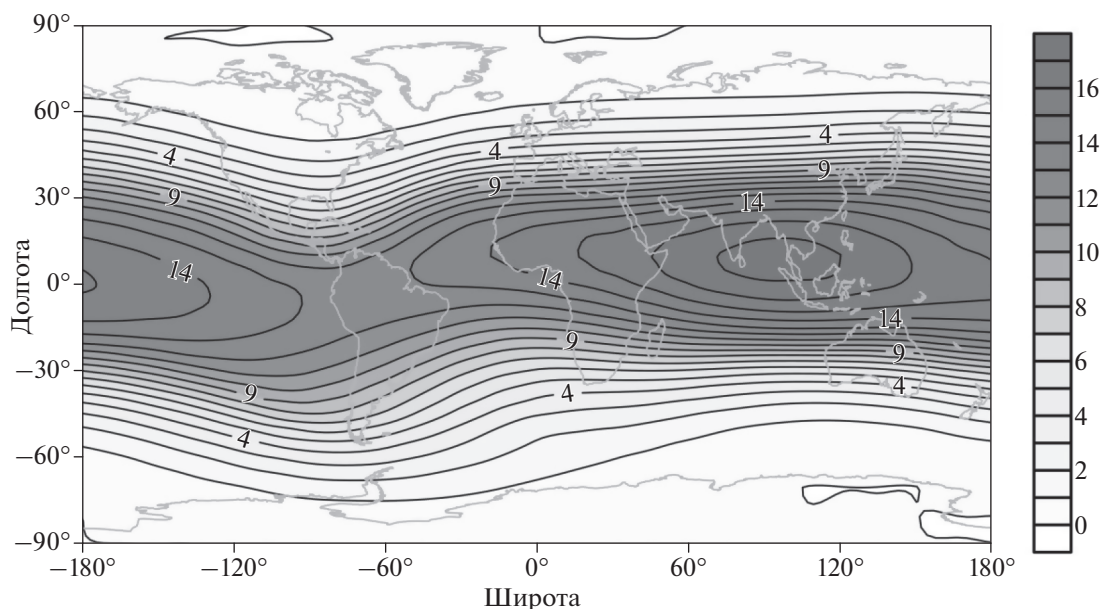


Рис. 2. Изолинии вертикальной жесткости обреза КЛ в поле IGRF2000, интерполированном на момент максимума бури (20 ноября 2003 г., 20:00 UT). Шкала такая же, как на рис. 1.

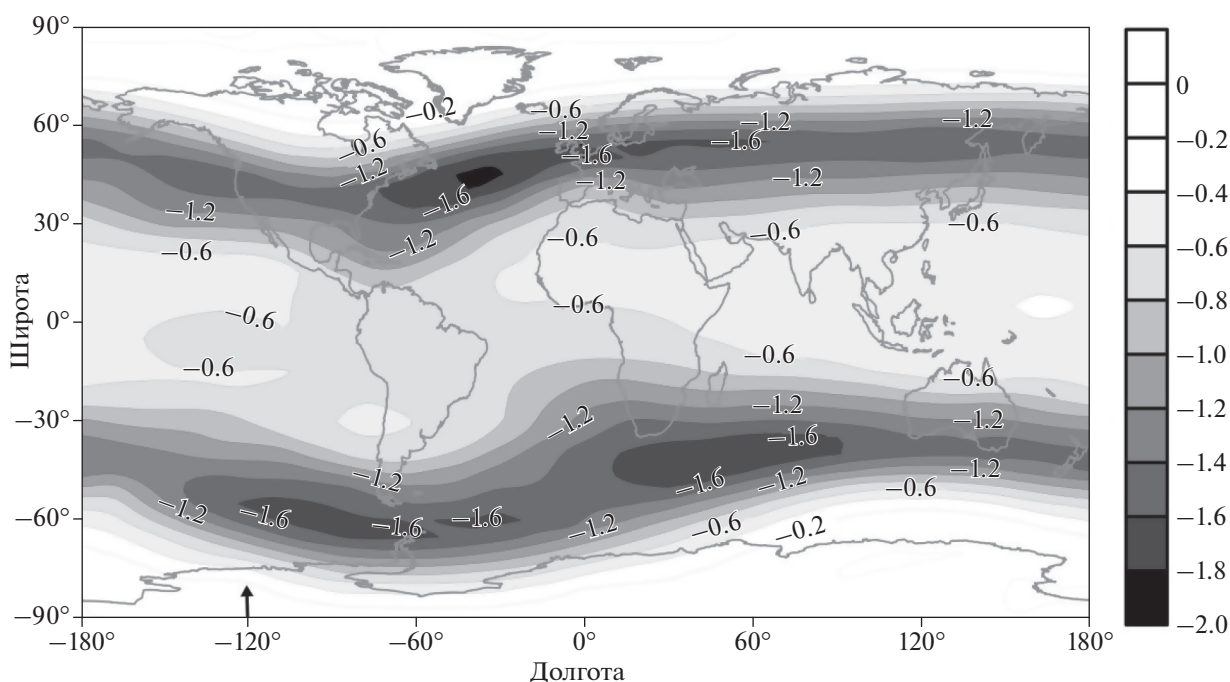


Рис. 3. Изолинии разности между ЖГО для возмущенного поля и для главного геомагнитного поля ΔR в 20:00 UT, 20 ноября 2003 г. Локальный полдень отмечен стрелкой на оси абсцисс. Шкала справа показывает различные уровни ΔR в единицах ГВ.

время максимума бури по широте и долготе. Наиболее характерной чертой карты является несимметричное распределение максимальных ΔR . Асимметрия проявляется в разнице максимального падения жесткостей и в разном приближении к экватору широтных поясов с максимальными ΔR в различных полушариях Земли.

Полоса широт с наибольшими падениями ЖГО в секторе долгот $180^\circ-0^\circ$ W демонстрирует дугу, которая в северном полушарии обращена выпуклостью к экватору, а в южном полушарии — к полюсу. Падение на $\sim 1.6-1.8$ ГВ наблюдается в северном полушарии в дневном и вечернем секторах на широтах $\sim 25^\circ-50^\circ$ N. В южном — макси-

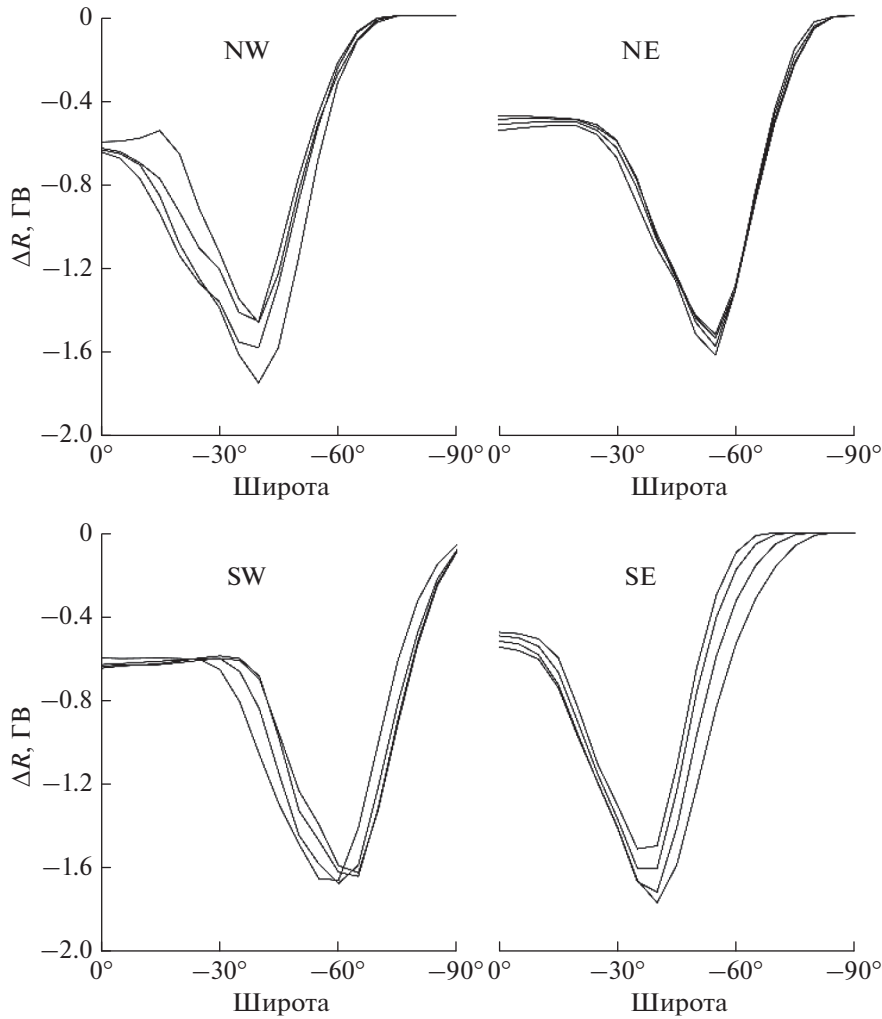


Рис. 4. Широтная зависимость падения геомагнитных порогов ΔR в северном и южном полушариях в двух долготных интервалах: (NW, SW): $60^\circ\text{--}105^\circ\text{ W}$; (NE, SE): $60^\circ\text{--}105^\circ\text{ E}$.

мальное падение на 1.4–1.6 ГВ наблюдается на широтах $\sim(40^\circ\text{--}75^\circ\text{ S})$. Таким образом, максимальное падение геомагнитных порогов в северном полушарии, в отличие от южного, наблюдается ближе к экватору. Кроме того, в северном полушарии ΔR несколько больше, чем в южном.

Для более детального отображения наблюдаемой асимметрии на рис. 4 приведены зависимости ΔR от широты вдоль меридиональных профилей $60^\circ\text{--}105^\circ\text{ W}$ и $60^\circ\text{--}105^\circ\text{ E}$. Это, соответственно, дневной и ночной сектора. Профили взяты через 15° , т.е. на каждом графике изображены четыре широтные кривые ΔR , отображающие сходное поведение падения геомагнитных порогов в каждом из исследуемых секторов.

Из рисунка 4 видно, что в дневном секторе в северном полушарии (рис. 4 NW) максимум ΔR наблюдается на широте $\sim 40^\circ\text{ N}$, а в южном (рис. 4 SW) — на широте $\sim 60^\circ\text{ S}$. В ночном секторе в северном полушарии (рис. 4 NE) максимум ΔR на-

блюдается на широте $\sim 55^\circ\text{ N}$, а в южном (рис. 4 SE) — на широте $\sim 40^\circ\text{ S}$. Кроме того, в северном полушарии максимальные значения ΔR в дневном секторе (1.7 ГВ) выше, чем в ночном (1.55 ГВ), а в южном полушарии максимальные значения ΔR в дневном секторе (1.6 ГВ) несколько ниже, чем в ночном (1.7 ГВ).

Таким образом, наши результаты (см. рис. 3 и рис. 4) демонстрируют северо-южную асимметрию, а также долготную зависимость распределения падений ЖГО.

Северо-южная асимметрия разного вида обнаруживалась в различных параметрах геомагнитного поля и КЛ. Геомагнитная активность в положительном секторе ММП в северном полушарии обнаруживала более высокие значения, чем в южном, а в отрицательном секторе ММП, наоборот, более высокая активность наблюдалась в южном полушарии [Siebert, 1968; Wilcox, 1968]. На большом наблюдательном материале в работе [Мака-

ров, 2016] было получено, что северо-южная асимметрия тем больше, чем выше уровень магнитной активности. Эта асимметрия проявляется в геомагнитных трехчасовых данных [Siebert, 1968] или в суточных вариациях [Wilcox, 1968; Макаров, 2016]. В работе [Макаров, 2016] предполагается, что наблюдаемая северо-южная асимметрия вызывается дополнительными меридиональными токами Педерсена, текущими между высокими и средними широтами в ионосфере; в зависимости от знака ММП эти токи развиваются либо в северном, либо в южном полушарии. При исследовании годичных вариаций КЛ по данным нейтронного монитора было найдено, что интенсивность КЛ возрастает при переходе из южного полушария в северное, когда магнитная полярность ММП положительная, и, наоборот, падает в эпоху отрицательной полярности [Крымский и др., 1981]. Северо-южная асимметрия, по результатам наблюдений, приведенным в работе [Крымский и др., 1981], связывалась авторами с изменениями гелиошироты Земли. В статье [Yoshida et al., 1968] исследовалась долготная асимметрия повышения потока космических лучей во время магнитных бурь (с исключением Форбуш-понижений) и было сделано предположение, что она связана с образованием частичного кольцевого тока. Долготные и широтные зависимости вариаций ЖГО исследовалась ранее [Flueckiger et al., 1987; Antonova et al., 1990; Дворников и Сдобнов, 2009]. Поскольку эти работы базировались на измерениях на станциях нейтронных мониторов, недостаточная статистика оставляла много белых пятен и, в частности, не позволяла выявить северо-южную асимметрию.

Выявленная нами северо-южная асимметрия ЖГО для бури 20 ноября 2003 г. (рис. 3 и рис. 4), находится в согласии с результатами работы [Wang et al., 2006], в которой исследовалось планетарное распределение продольных токов в это время по измерениям на спутнике CHAMP. Wang et al. [2006] обнаружили северо-южную асимметрию распределения продольных токов в дневном секторе магнитосферы.

Соотношение понижения и увеличения геомагнитных порогов на разных широтах и долготах зависит от интенсивности токовых систем, описывающих обжатие магнитосферы, и от падения интенсивности магнитного поля внутри магнитосферы под влиянием кольцевых токов [Асауленко и др., 1965]. Кроме симметричного кольцевого тока во время сильных магнитных бурь образуются несимметричные кольцевые токи как ответ на влияние возмущений в солнечном ветре. Частичные несимметричные кольцевые токи имеют максимум в вечернем секторе в главной фазе магнитной бури [напр., Cummings, 1996; Liemohn et al., 2001; Dmitriev et al., 2004]. Эти частичные кольцевые токи в северном и южном полушариях замы-

каются через продольные токи в ионосфере [Калегаев и др., 2008]. Полученная нами долготная асимметрия с максимумом падений ЖГО в вечернем секторе (рис. 3 и рис. 4) позволяет предположить, что изменения геомагнитных порогов в максимуме бури 20 ноября 2003 г. происходили в основном за счет усиления частичного несимметричного кольцевого тока. В работе [Kress et al., 2010] получены свидетельства того, что понижения жесткостей во время максимума бури 23 октября 2003 г. также вызвано частичным круговым током.

Кроме того, в сложную картину распределения ЖГО в максимуме магнитной бури по долготе, вносят вклад и токовые системы хвоста. Исследования токовых систем хвоста магнитосферы [Greenspan and Hamilton, 2000; Maltsev, 2004; Maltsev and Ostapenko, 2004] показали, что токи, ответственные за депрессию магнитного поля, имеют большую долготную асимметрию. Они создают аксиально-асимметричное возмущение в магнитном поле магнитосферы, которое может влиять на глобальное распределение ЖГО сложным образом.

Существенное понижение геомагнитного порога вплоть до широт 45° – 30° N во многих долготных интервалах способствовало вторжению дополнительного потока заряженных частиц в низкие широты и, соответственно, возбуждению среднеширотных и низкоширотных полярных сияний, которые наблюдались во время этой бури как в восточном, так и в западном полушарии. В качестве характерного примера можно привести расчеты геомагнитных порогов для двух станций Москва и Апатиты 20 ноября 2003 г. в минимуме *Dst* по данным нейтронных мониторов этих станций [Тясто и др., 2008]. На ст. Москва в спокойное время ЖГО составляет 2.10 ГВ, а во время этой бури ЖГО равна ~ 0.3 ГВ, снижаясь, таким образом, на 1.81 ГВ, т.е. ЖГО становится ниже, чем предбуревой геомагнитный порог на ст. Апатиты, расположенной практически в авроральной зоне. Наши выводы хорошо согласуются с результатами исследования, проведенного Blanch et al. [2005] на базе данных измерений Европейских ионозондов и GPS. Blanch et al. [2005] нашли, что электрические поля и состав частиц, характерные для авроральной зоны, наблюдались над Европейским долготным сектором в широтном поясе 45° – 30° N в вечерние часы 20 ноября 2003 г.

4. ВЫВОДЫ

Мы оценили вклад внешних источников в вариации жесткости геомагнитного обрезания ΔR во время главной фазы магнитной бури 20 ноября 2003 г. Для этого мы рассчитали ΔR как разность между ЖГО в магнитном поле магнитосферной

модели Ts01, учитывающей как внутренние, так и внешние источники, и ЖГО только в главном магнитном поле Земли. Геомагнитные пороги рассчитаны по широтно-долготной сетке $5^\circ \times 15^\circ$ в минимуме *Dst* в 20:00 UT. Анализ полученных результатов показал следующее.

1. На средних и в низких широтах наблюдается снижение геомагнитных порогов по сравнению с порогом в главном поле на величину, достигающую 1.8 ГВ. В экваториальной области ΔR составляет 0.5–0.6 ГВ. Падение жесткостей имеет наибольшую величину в вечерне-ночном секторе.

2. Глобальное распределение ΔR обнаруживает северо-южную асимметрию, а также асимметрию день–ночь. Это выражается в том, что в дневном секторе в северном полушарии максимум ΔR наблюдается на широте $\sim 40^\circ$, а в южном – на широте $\sim 60^\circ$. В ночном секторе в северном полушарии максимум ΔR , напротив, наблюдается на широте $\sim 55^\circ$, а в южном полушарии – на широте $\sim 45^\circ$.

3. В северном полушарии максимальные значения ΔR в дневном секторе (1.7 ГВ) выше, чем в ночном (1.55 ГВ), а в южном полушарии максимальные значения ΔR в дневном секторе (1.6 ГВ) несколько ниже, чем в ночном (1.7 ГВ).

Наблюдаемые магнитосферные эффекты в распределении ΔR обусловлены, по-видимому, доминирующим влиянием частичного кольцевого тока, развивающегося в максимуме бури. Значительное понижение геомагнитных порогов на средних и в низких широтах способствовало вторжению в атмосферу Земли дополнительного потока космических частиц, которые могли быть ответственны за низко- и среднеширотные полярные сияния, широко наблюдавшиеся во время этой магнитной бури.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Асауленко Л.Г., Дорман Л.И., Смирнов В.С., Тясто М.И. Эффект ограниченности геомагнитного поля в космических лучах // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 5. № 5. С. 809–815. 1965.
- Веселовский И.С., Панасюк М.И., Авдюшин С.И. и др. Солнечные и гелиосферные явления в октябре–ноябре 2003 г.: причины и следствия // Космич. исслед. Т. 42. № 5. С. 453–508. 2004.
- Дворников В.М., Сдобнов В.Е. Модификация метода спектрографической глобальной съемки для изучения вариаций планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания // Изв. АН СССР. Сер. физ. Т. 55. № 10. С. 1988–1991. 1991.
- Дворников В.М., Сдобнов В.Е. Изменения жесткости геомагнитного обрезания космических лучей в отдельных пунктах Азиатского региона в период экстремальных событий 2003 г. // Солнечно-земная физика. Вып. 14. С. 23–26. 2009.
- Ермолаев Ю.И., Зеленый Л.М., Застенкер Г.Н. и др. Солнечные и гелиосферные возмущения, приведшие к сильной магнитной буре 20 ноября 2003 г. // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 45. № 1. С. 23–50. 2005.
- Калегаев В.В., Бахмина К.Ю., Алексеев И.И., Беленькая Е.С., Фельдштейн Я.И., Ганюшкина Н.В. Асимметрия кольцевого тока во время магнитной бури // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 48. № 6. С. 780–792. 2008.
- Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Мамрукова В.П., Скрипин Г.В. Эффекты взаимодействия гелиомагнитосферы с галактическим полем в космических лучах // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 21. № 5. С. 923–925. 1981.
- Макаров Г.А. Северо-южная асимметрия геомагнитной активности и электрическое поле солнечного ветра // Солнечно-земная физика. Т. 2. № 1. С. 32–35. 2016.
- Михалев А.В. Среднеширотные сияния в восточной Сибири в 1991–2012 гг. // Солнечно-земная физика. Вып. 24. С. 78–83. 2013.
- Тясто М.И., Данилова О.А., Дворников В.М., Сдобнов В.Е. Отражение параметров солнечного ветра в жесткости геомагнитного обрезания космических лучей в период сильной магнитной бури в ноябре 2003 // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 48. № 6. С. 723–740. 2008.
- Antonova O.F., Baisultanova L.M., Belov A.V., Dorman L.I., Yanke V.G. The longitude and latitude dependences of the geomagnetic cutoff rigidity variations during strong magnetic storms / Proc. of the 21st Intern. Cosmic Ray Conference. 6–19 January 1990. Adelaide, Australia. V. 7. Ed. R. J. Protheroe. P. 10–13. 1990.
- Belov A., Baisultanova L., Eroshenko E., Mavromichalaki H., Yanke V., Pchelkin V., Plainaki C., Mariatos G. Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003 // J. Geophys. Res. V. 110. A09S20. 2005. doi 10.1029/2005JA011067
- Blanch E., Altadill D., Boška J., Burešova D., Hernandez-Pajares M. November 2003 event: effects on the Earth's ionosphere observed from ground-based ionosonde and GPS data // Ann. Geophysicae. V. 23. № 9. P. 3027–3034. 2005.
- Bojanowska M. Extremely strong magnetic storms Aurora Borealis over Poland // Przegląd Geofizyczny. Z. 3–4. P. 219–227. 2005.
- Cummings W. Asymmetric ring currents and the low-latitude disturbance daily variation // J. Geophys. Res. V. 71. № 19. P. 4495–4503. 1966.
- Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Chao J.-K., Yang Y.-H. Dawn-dusk asymmetry of geosynchronous magnetopause crossings // J. Geophys. Res. V. 109. A05203. 2004. doi 10.1029/2003JA010171
- Dorman L.I., Gushchina R.T., Smart D.F., Shea M.A. Effective cut-off rigidities of cosmic rays. M.: Nauka. 1972.
- Dvornikov V.E., Sdobnov V.E. Variations in the rigidity spectrum and anisotropy cosmic rays at the period of Forbush effect on the 12–25 July 1982 // Intern. J. Geomagn. Aeron. V. 3. № 3. P. 217–223. 2002.
- Fillius R.W. Penetration of solar protons to four Earth radii in the equatorial plane // Ann. Geophys. V. 24. P. 821–840. 1968.
- Flueckiger E.O., Shea M.A., Smart D.F. On the latitude dependence of cosmic ray cutoff rigidity variations during the initial phase of a geomagnetic storm // Proc. of the 20th

- Intern. Conf. Cosmic Rays.2–15 Aug 1987. Moscow. USSR. V. 4. P. 216. 1987.
- *Greenspan M., Hamilton D.C.* A test of the Dessler–Parker–Sckopke relation during magnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 105. P. 5419–543. 2000.
- *Kress B.T., Mertens C.J., Wiltberger M.* Solar energetic particle cutoff variations during the 29–31 October 2003 geomagnetic storm // *Space Weather.* V. 8. S05001. 2010. doi 10.1029/2009SW000488
- *Kress B.T., Hudson M.K., R.S. Selesnick R.S., Mertens C.J., Engel M.* Modeling geomagnetic cutoffs for space weather applications // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 120. № 7. P. 5694–5702. doi.org/10.1002/2014JA020899.2015.
- *Kudela K., Storini M., Hofer M.Y., Belov A.* Cosmic rays relation to space weather // *Space Sci. Revs.* V. 93. P. 153–174. 2000.
- *Lanzerotti L.J.* Penetration of solar protons and alphas to the geomagnetic equator // *Phys. Rev. Lett.* V. 21. № 13. P. 929–933. 1968.
- *Liemohn M.W., Kozyra J.U., Thomsen M.F., Roeder G.Lu., Borovsky J.E., Cayton T.E.* Dominant role of the asymmetric ring current in producing the stormtime Dst^* // *J. Geophys. Res.* V. 106. A6. P. 10883–10904. 2001.
- *Maltsev Y.P., Ostapenko A.A.* Azimuthally asymmetric ring current as a function of Dst and solar wind conditions // *Ann. Geophysicae.* V. 22. № 8. P. 2989–2996. 2004.
- *Maltsev Y.P.* Points of controversy in the study of magnetic storms // *Space Sci. Rev.* V. 110. № 3–4. P. 227–277. 2004.
- *McCracken K.G., Rao U.R., Shea M.A.* The trajectories of cosmic rays in a high degree simulation of the geomagnetic field // *M.I.T. Tech. Rep. 77.* Lab. for Nucl. Sci. and Eng., Mass. Inst. of Technol. Cambridge. 1962.
- *Paulikas G.A., Blake J.B.* Penetration of solar protons to synchronous altitude // *J. Geophys. Res.* V.74. A9. P. 2161–2168. 1969. doi 10.1029/JA074i009p02161
- *Shea M.A., Smart D.F., McCracken K.G.* A study of vertical cutoff rigidities using sixth degree simulations of the geomagnetic field // *J. Geophys. Res.* V. 70. P. 4117–4130. 1965.
- *Siebert M.* Magnetic activity differences between the two hemispheres following the sector structure of the interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* V. 73. P. 3049–3052. 1968.
- *Smart D.F., Shea M.A.* The space-developed dynamic vertical cutoff rigidity model and its applicability to aircraft radiation dose // *Adv. Space Res.* V. 32. № 1. P. 103–108. 2003. doi 10.1016/S0273-1177(03)90376-0
- *Smart D.F., Shea M.A., Tylka A.J., Boberg P.R.* A geomagnetic cutoff rigidity interpolation tool: Accuracy verification and application to space weather // *Adv. Space Res.* V. 37. № 6. P. 1206–1217. 2006. doi 10.1016/j.asr.2006.02.011
- *Tsyganenko N.A.* A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 1. Mathematical structure // *J. Geophys. Res.* V. 107. A8. 1179. 2002a. doi 10.1029/2001JA000219
- *Tsyganenko N.A.* A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 2. Parametrization and fitting to observation // *J. Geophys. Res.* V. 107. A8. 1176. 2002b. doi 10.1029/2001JA000220
- *Tsyganenko N.A., Singer H.J., Kasper J.C.* Storm-time distortion of the inner magnetosphere: How severe can it get? // *J. Geophys. Res.* V. 108. A5. 1209. 2003. doi 10.1029/2002JA009808
- *Tsyganenko N.A., Sitnov M.I.* Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 110. A03208. 2005. doi 10.1029/2004JA010798
- *Tyasto M.I., Danilova O.A., Sdobnov V.E.* Cosmic ray geomagnetic cutoff rigidities in the magnetic fields of two empirical models during a strong disturbance in November 2003: A comparison of models // *Geomagn. Aeron.* V. 52. № 8. P. 1087–1096. 2012.
- *Tyasto M.I., Danilova O.A., Ptitsyna N.G., Sdobnov V.E.* Variations in cosmic ray cutoff rigidities during the great geomagnetic storm of November 2004 // *Adv. Space Res.* V. 51. № 7. P. 1230–1237. 2013.
- *Vazquez M.V., Vaquero J.M.* Aurorae observed at the Canary Islands // *Solar Phys.* V. 267. № 2. P. 431–444. 2010.
- *Wang H., Lüher H., Ma S., Weygand J., Skoug R.M., Yin F.* Field-aligned currents observed by CHAMP during the intense 2003 geomagnetic storm events // *Ann. Geophysicae.* V. 24. № 1. P. 311–324. SRef-ID: 1432-0576/ag/2006-24-311. 2006.
- *Wilcox J.M.* Asymmetry in the geomagnetic response to the polarity of the interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 73. P. 6835–6836. 1968.
- *Yoshida S., Akasofu S.-I., Kendal P.S.* Ring current effects on cosmic rays // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 73. P. 3377–3394. 1968.