

УДК 550.338

Отклик параметров среднеширотной верхней атмосферы на геомагнитную бурю 21 января 2005 г. по данным оптических, магнитных и радиофизических измерений

Л.А. Леонович, А.В. Михалев, А.В. Тащилин, Р.А. Рахматулин,
В.А. Леонович, А.Ю. Пашинин*

*Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291*

Поступила в редакцию 15.06.2012 г.

Исследуется отклик параметров верхней атмосферы средних широт на уникальную геомагнитную бурю 21 января 2005 г. Для анализа использовались данные измерений интенсивности свечения атмосферных эмиссий атомарного кислорода 557,7 и 630 нм, магнитосферных пульсаций и вариаций параметров ионосферы, полученных для региона Восточной Сибири (52° с.ш., 103° в.д.). Во время этой бури в рассматриваемом регионе наблюдалось проникновение глобального электрического поля на средние широты, геомагнитные пульсации в диапазоне периодов от 0,2 до 1000 с, поглощение радиоволн в *D*-области ионосферы, появление спорадических образований *E_s* аврорального типа, увеличение интенсивности атмосферных эмиссий 630 и 557,7 нм. Результаты проведенных исследований указывают на то, что причиной возмущения параметров верхней атмосферы средних широт во время геомагнитных бурь могут быть выпадения энергичных заряженных частиц в ионосферу в периоды сжатия магнитосферы под воздействием усиленного динамического давления солнечного ветра.

Ключевые слова: ионосферное возмущение, свечение верхней атмосферы, геомагнитные бури, пульсации; ionospheric disturbance, airglow, geomagnetic storm, pulsations.

Введение

Известно, что солнечная активность определяет состояние верхней атмосферы и ионосферы Земли. Динамические процессы на Солнце, такие как солнечные вспышки, корональные выбросы массы (coronal mass ejection – CME), высокоскоростные потоки солнечного ветра, следующие за ударной волной от мощных вспышечных событий или истекающие из корональных дыр, являются источником геомагнитных возмущений на Земле. Магнитная буря (МБ) является реакцией магнитосферы на внезапное увеличение динамического давления солнечного ветра. Потоки солнечных частиц создают в околоземном пространстве электрические токи, которые приводят к понижению геомагнитного поля на поверхности Земли. Во время магнитной бури происходит интенсивное выделение энергии в магнитосфере и ионосфере, которое контролируется величиной и направлением межпланетного магнитного поля (ММП). МБ

продолжаются от нескольких часов до нескольких суток и наблюдаются одновременно на всей Земле.

При анализе бури выделяют четыре фазы ее развития: предварительная, начальная, главная и фаза восстановления. В предварительной фазе наблюдаются незначительные изменения геомагнитного поля (в основном в высоких широтах), а также возбуждение характерных короткопериодических колебаний магнитного поля. Начальная фаза может иметь внезапное начало (SSC – sudden storm commencement), которое отмечает приход ударной волны из межпланетного пространства к Земле. Во время SSC происходит усиление токов на магнитопаузе, оказывающих влияние на магнитное поле в магнитосфере. Это влияние проявляется в кратковременном положительном скачке индекса D_{st} на фазе SSC. Интервал между внезапным началом бури и началом уменьшения *H*-компоненты магнитного поля Земли в главной фазе определяется как начальная фаза и может продолжаться от 30 мин до нескольких часов. На главной фазе бури развитие кольцевого тока и интенсификация токов хвоста магнитосферы приводят к резкому падению индекса D_{st} и уменьшению магнитного поля Земли, которое может продолжаться несколько часов, а иногда и дней. В фазу восстановления магнитной бури смена знака ММП приводит к разрушению кольцевого тока в магнитосфере

* Людмила Анатольевна Леонович (lal@iszf.irk.ru); Александр Васильевич Михалев (mikhalev@iszf.irk.ru); Анатолий Васильевич Тащилин (avt@iszf.irk.ru); Равиль Анатольевич Рахматулин (rav@iszf.irk.ru); Виталий Анатольевич Леонович (leonkgb@mail.ru); Александр Юрьевич Пашинин (pash@iszf.irk.ru).

и к последующему восстановлению спокойного уровня геомагнитного поля.

Настоящая статья посвящена анализу возмущения параметров среднеширотной верхней атмосферы, таких как магнитосферные пульсации, интенсивности атмосферных эмиссий атомарного кислорода 557,7 и 630 нм (зеленой и красной линии), электронная концентрация и высота максимума F_2 -слоя ионосферы во время геомагнитной бури 21–22 января 2005 г.

Результаты наблюдений и обсуждение

Магнитная буря 21–22 января ($K_p = 8$, $D_{st} = -120$ нТл) последовала за солнечной вспышкой класса X7.1, которая произошла 20 января в 06:36 UT. Несмотря на глубокую нисходящую фазу солнечной активности, эта вспышка сопровождалась сильным гамма-излучением с величиной энергии фотонов, достигающей до 200 МэВ, — одним из самых больших микроволновых всплесков с максимальной спектральной частотой ≈ 30 ГГц, мощным корональным выбросом массы, а также очень жестким спектром интенсивного потока солнечных энергичных частиц вблизи Земли. Зафиксированное увеличение интенсивности космических лучей является вторым по величине в истории наблюдений [1].

В работе были использованы данные наблюдений эмиссий атомарного кислорода 557,7 и 630 нм, полученные в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (52° с.ш., 103° в.д.) при помощи 4-канального зенитного фотометра «Феникс». Для анализа ионосферных возмущений использовались данные критической частоты и высоты максимума F_2 -слоя, полученные на дигизонде станции «Иркутск» (52° с.ш., 103° в.д.). Данные колебаний магнитного поля Земли получены на Магнитной обсерватории «Иркутск».

Возмущения в магнитосфере и ионосфере средних широт

Активные процессы на Солнце вызвали сильные возмущения в межпланетном и околоземном космическом пространстве. Резкое усиление давления солнечного ветра привело к сжатию магнитопаузы до $\sim 4,7 R_e$ [1]. Внезапное начало для этой бури было зафиксировано дважды (в 17:12 и 18:47 UT) в соответствии с подходом двух ударных волн [2]. Оба импульса сопровождалась резкими увеличениями скорости и плотности частиц солнечного ветра и быстрыми вариациями Vz-компоненты межпланетного магнитного поля. На рис. 1 приведены временные вариации индекса D_{st} (а), H -компоненты магнитного поля Земли, полученные на Магнитной обсерватории «Иркутск» (б), высоты максимума слоя $h_m F_2$ (в), критической частоты $f_0 F_2$ (г), а также атмосферных эмиссий 630 (д) и 557,7 нм (е).

Пунктирными линиями на панелях (рис. 1, в, г) показаны вариации параметров для спокойного дня.

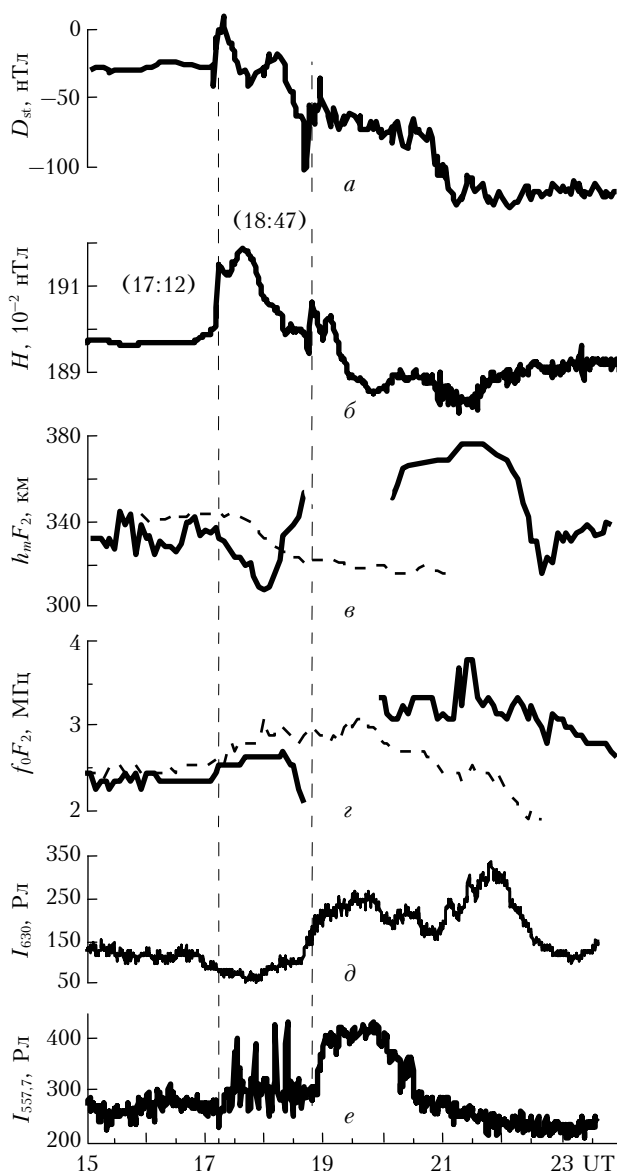


Рис. 1. Параметры верхней атмосферы во время магнитной бури 21 января 2005 г.

Вертикальными пунктирными линиями отмечены моменты подхода к Земле ударных волн. Согласно данным работы [3], во время подхода первой ударной волны (17:12 UT) произошло проникновение на средние широты направленного на запад глобального электрического поля, которое вызвало дрейф плазмы вниз на высотах F -области ионосферы. По данным ионосферной станции Иркутск с этого момента началось понижение $h_m F_2$ (на 40 км) в область более высоких скоростей потерь заряженных частиц в ионно-молекулярных реакциях (рис. 1, в). Вследствие этого в 18:20 UT отмечено резкое уменьшение критической частоты $f_0 F_2$. Далее наблюдался рост $h_m F_2$, который может быть связан с подъемом ионосферной плазмы вверх под действием усиленного термосферного ветра, дующего к экватору от возмущенного аврорального овала.

Во время второго импульса SC началось поглощение радиоволн в D -области ионосферы (в дальнейшем используется просто термин «поглощение») и продолжалось до 20:00 UT. Полное поглощение наблюдалось в интервале 19:00–20:00 UT, а также в моменты 20:20 UT и 20:55 UT. По данным дигизонда после поглощения (20:00 UT) минимальная частота отражения от ионосферы увеличилась в 2 раза. Критическая частота f_0F_2 резко возросла более чем в 1,5 раза, что свидетельствует о возрастании концентрации электронов (рис. 1, σ , z). Причина увеличения электронной концентрации во время геомагнитных возмущений на средних широтах может быть связана с изменением состава нейтральной атмосферы [4–6].

На рис. 2 показаны ионограммы для двух моментов — перед поглощением, когда наблюдалось отражение от F_2 -области, и во время поглощения.

В 18:45 UT в E -области наблюдалось появление спорадических образований на высотах 120–150 и 170–200 км, которые сохраняются и на последующих ионограммах. Из-за поглощения в D -области невозможно точно определить характеристики этих слоев, но можно сказать, что это достаточно плотные образования. По форме они относятся к спорадическим слоям E_s аврорального типа. Нижний слой характеризуется запаздыванием у высокочастотного конца — это E_s типа « $E_{s,r}$ » [7]. Верхний, рассеянный по высоте спорадический слой E_s типа « $E_{s,a}$ » [7], экранирует область F_2 . Появление этих образований указывает на повышение ионизации в ночной E -области. Источником спорадических E_s -образований аврорального типа являются высыпания энергичных частиц в ионосферу. Существует ряд работ, которые свидетельствуют об увеличении (более чем на порядок) плотности ионизации ночной E -области ионосферы во время магнитных бурь на низких и средних широтах [8–12]. В работе [13] на основе моделирования было показано, что высыпания нейтрализованных частиц кольцевого тока вызывают эффекты положительных ионосферных бурь в ночной E -области на средних и низких широтах (от 25 до 50° геомагнитной широты).

В работе [14] было предположено, что энергичные электроны с энергиями $E > 70$ кэВ могут быть источником ионизации ночной среднеширотной E -области ионосферы, что может являться причиной связи между увеличением скорости ионизации в верхней E -области ионосферы и геомагнитной активностью.

По данным спутника Coronas-F [15], во время рассматриваемой магнитной бури пик потоков релятивистских электронов (0,6–1,5 МэВ) внешнего радиационного пояса сместился на оболочку $L = 2,7$ (L — параметр Мак-Иллвейна). С другой стороны, согласно данным спутника POES, во время рассматриваемой МБ на ночной стороне концентрация энергичных электронов ($E \sim 30$ кэВ) в радиационном поясе увеличилась примерно на 2 порядка, а электронов с энергиями $E \sim 100$ кэВ — более чем на 3 порядка. Примерно на такую же величину возросла концентрация протонов в диапазонах энергий 30–80

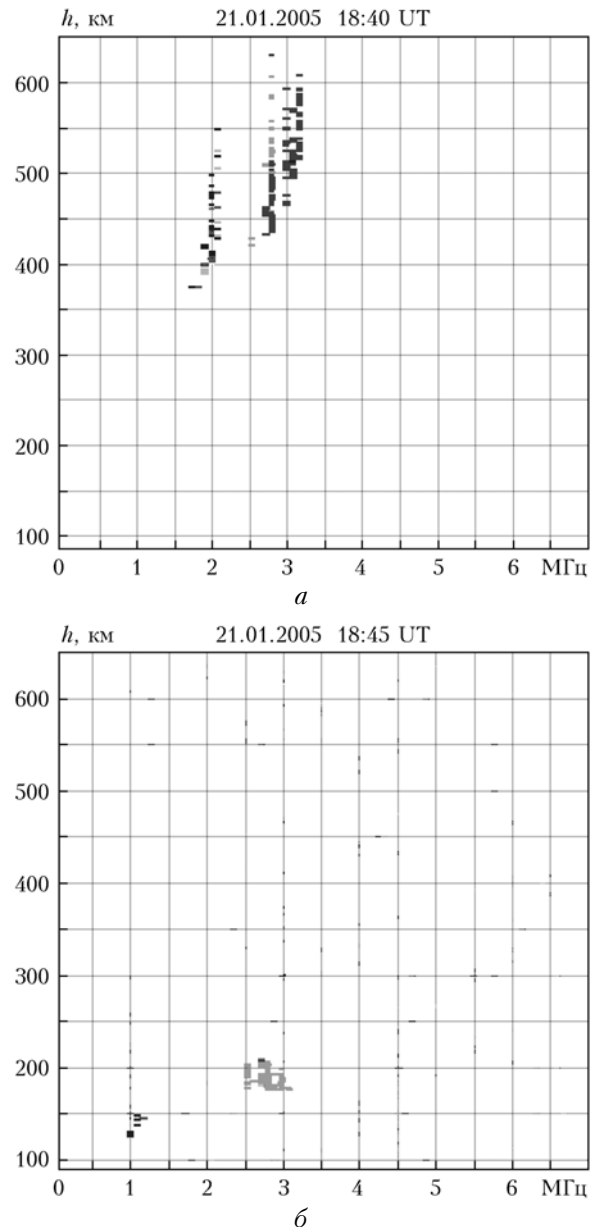


Рис. 2. Примеры ионограмм во время магнитной бури 21 января 2005 г. для двух моментов: перед поглощением (18:40 UT), когда наблюдалось отражение от F_2 -области, и во время поглощения в D -области (18:45 UT)

и 80–240 кэВ (<http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/poes/data/>).

Во время данной бури в Иркутске наблюдались геомагнитные пульсации типа Pc1 в диапазоне периодов 0,2–2 с (рис. 3, a) и длиннопериодные (рис. 3, b) в диапазоне 50–1000 с.

Появление Pc1 связывают с инжекцией в магнитосферу протонов в диапазоне энергий 1–10 кэВ. Наиболее мощные всплески пульсаций имели место в периоды 17:12–17:25 и 18:45–19:00 UT, т.е. после прихода первой и второй ударных волн. Именно в эти же самые периоды в атмосфере наблюдался значительный рост интенсивности эмиссий 630 и 557,7 нм.

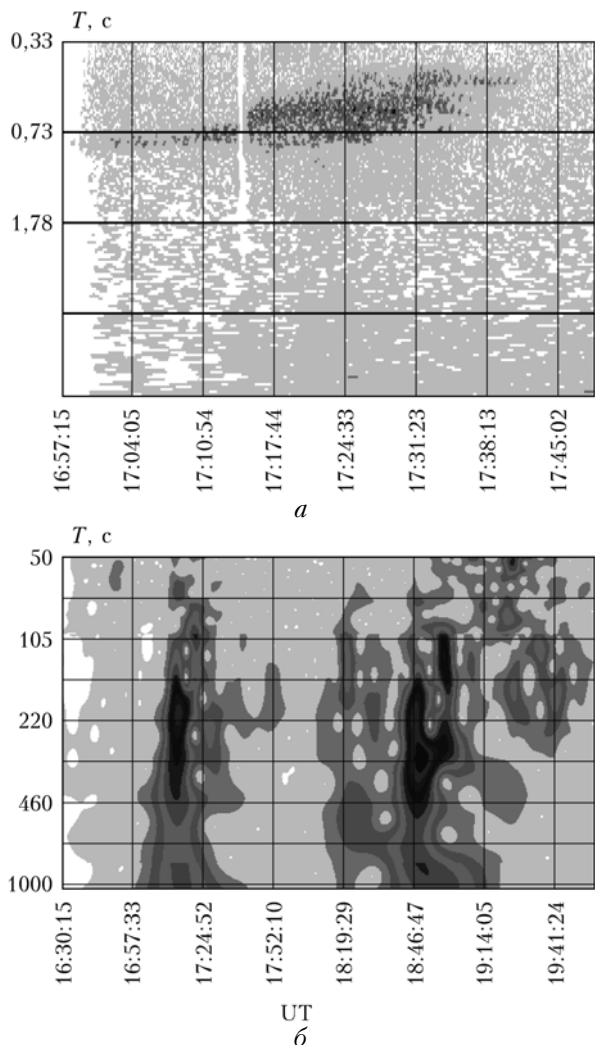
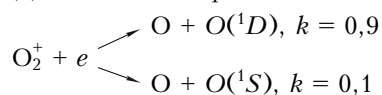


Рис. 3. Геомагнитные пульсации типа Pc1 в диапазоне периодов 0,2–2 с (а) и длиннопериодные геомагнитные пульсации в диапазоне периодов 50–1000 с (б) во время магнитной бури 21 января 2005 г.

Свечение среднеширотной верхней атмосферы

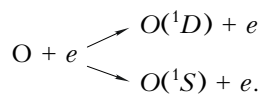
Основным механизмом возбуждения эмиссий 557,7 и 630 нм на высотах F -области (180–300 км) средних широт принято считать химические реакции диссоциативной рекомбинации O_2^+ и теплового возбуждения атомов кислорода.

Диссоциативная рекомбинация:



(k – коэффициент ветвления реакции).

Столкновение с тепловыми электронами:



Выход этих реакций пропорционален концентрации молекулярных ионов кислорода O_2^+ , электронов

e и атомов кислорода O , которые изменяются во время ионосферных возмущений, вызванных перемещающимися ионосферными возмущениями и акустико-гравитационными волнами, а также вариациями параметров термосферного ветра.

Высыпание энергичных частиц как источник свечения атмосферы в средних широтах рассматривается только при условии очень больших магнитных бурь, когда $D_{st} \sim -350 \div -400$ нТл. В нашем случае $D_{st} \sim 120$ нТл. Тем не менее у нас есть основания предполагать, что источником свечения во время геомагнитной бури 21–22 января были высыпания энергичных частиц.

Рассмотрим возможные механизмы увеличения интенсивности эмиссий 630 и 557,7 нм во время этой бури. Для интерпретации показанных на рис. 1 особенностей этих эмиссий можно воспользоваться предположенной в [16] классификацией средне- и низкоширотных сияний во время геомагнитных бурь. В этой классификации отношение интенсивностей этих эмиссий $r = I_{630}/I_{557,7}$ используется в качестве одного из признаков, характеризующих тип сияния и энергию частиц, высыпаящихся в ионосферу. Во время бури 21 января 2005 г. были выделены три периода, в которые произошло увеличение интенсивности свечения с различными величинами $I_{630}/I_{557,7}$.

Первый период был отмечен после прихода первой ударной волны (примерно с 17:12 до 18:30 UT). В интенсивности эмиссии 557,7 нм в течение 1,5 ч наблюдались пульсирующие вариации с амплитудой ~ 150 Рл, форма которых не типична для средних широт, а характерна для авроральной зоны. Аналогичные по форме вариации некоторых эмиссий отмечались во время главной фазы двух больших магнитных бурь 29–31 октября и 20–21 ноября 2003 г., когда авроральная зона находилась над местом наблюдения (Восточная Сибирь, 52° с.ш., 103° в.д.). Источник этих вариаций связывался с высыпанием авроральных электронов [17].

Отсутствие аналогичных вариаций в эмиссии 630 нм может указывать на относительно низкие высоты высвечивания эмиссии 557,7 нм (≤ 130 км) [18]. Можно предположить, что в этом случае причиной увеличения интенсивности эмиссий могли быть высыпания электронов с энергиями $E \sim 1\text{--}20$ кэВ, обусловленные их питч-угловым рассеянием при взаимодействии с альфвеновскими волнами, возбуждаемыми в магнитосфере во время геомагнитных бурь [19–21]. Высыпания, вероятно, происходили из расположенных в плазмосфере радиационных поясов. Этот интервал времени соответствует времени появления длиннопериодных геомагнитных пульсаций, а также Pc1. Для этого периода величина r оказалась много меньше 1. Случаи наблюдений таких вариаций в [16] не отмечены и, соответственно, не указаны в качестве отдельного типа среднеширотных сияний.

Второй период отмечен после прихода второй ударной волны, примерно с 18:45 до 21:00 UT, когда наблюдалось одновременное увеличение интенсивности эмиссий 557,7 и 630 нм на 150–200 Рл со значением величины r приблизительно 1. Этот вид воз-

мушения, согласно [16], относится к среднеширотным сияниям типа «*d*» ($1 < r < 10$), который возбуждается электронами с энергиями $\sim 10\text{--}1000$ эВ, наблюдается преимущественно в главные фазы магнитных бурь и ассоциируется с проекцией ближней зоны плазмопаузы в ионосферу. В ионосфере в этот период наблюдались поглощение радиоволн в *D*-области и увеличение ионизации в *E*- и *F*-областях, связанное, вероятно, с высыпанием энергичных частиц. Подобные вариации эмиссий 630 и 557,7 нм с $1 < r < 10$ в главные фазы магнитных бурь отмечались ранее в работах [17, 22, 23].

В *третий период*, приблизительно с 21:00 по 23:00 UT, на фазе развитого кольцевого тока отмечено увеличение интенсивности эмиссии 630 нм. Этот тип возмущений с $r \gg 10$, согласно [16], относится к среднеширотным сияниям типа SAR-дуг низкой интенсивности, который возникает на высотах $\sim 350\text{--}400$ км (см. рис. 1, *д*) и возбуждается электронами с энергиями < 10 эВ, образующимися в результате кулоновских столкновений тепловых электронов плазмосферы с ионами кольцевого тока. Этот тип среднеширотных сияний (SAR-дуги) также отмечался ранее в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН на фазах восстановления магнитных бурь [22, 24]. В работе [25] по пространственной динамике SAR-дуг в субавроральной ионосфере для рассматриваемого долготного региона показано, что при увеличении магнитной активности ($K_p > 5$) SAR-дуги смещаются в экваториальном направлении.

Заключение

Результаты исследований вариаций ионосферных параметров, эмиссий верхней атмосферы и магнитосферных пульсаций во время начальной фазы умеренной геомагнитной бури 21–22 января 2005 г. указывают на вероятность высыпания энергичных заряженных частиц из радиационных поясов и плазмосферы в ионосферу средних широт в периоды сжатия магнитосферы усиленными потоками солнечного ветра.

Выражаем искреннюю благодарность Г.К. Матафонову, Е.Б. Романовой, Н.А. Золотухиной, Г.В. Котович за полезные дискуссии, К.Г. Ратовскому и С.А. Нечаеву за предоставленные ионосферные и магнитные данные.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 12-05-00024-а, 10-05-00786 и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 4 (научное направление № 8).

1. Rawat R., Alex S., Lakhina G.S. Low latitude geomagnetic signatures following two major solar energetic particle events at different phases of solar cycle-23. Goa, ILWS Workshop, 2006.
2. Du M., Tsurutani B.T., Sun W. Anomalous geomagnetic storm of 21–22 January 2005: A storm main phase during northward IMFs // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. A10214. doi: 10.1029/2008JA013284.
3. Ikeda A., Yumoto K., Shinohara M., Nozaki K., Yoshikawa A., Shinbori A. SC-associated Ionospheric Electric Fields at Low Latitude: FM-CW Radar Observation // Earth & Planet. Sci. 2008. V. XXXII, N 1. P. 1–6.
4. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
5. Кнут Р., Вюрцбергер И. Ионосферные возмущения на средних широтах, вызванные частицами высоких энергий // Геомагнет. и аэроном. 1976. Т. 16, № 4. С. 666–673.
6. Лаитовичка Я., Федорова Н.И. Необычное среднеширотное ионосферное возмущение корпускулярного происхождения // Геомагнет. и аэроном. 1976. Т. 16, № 6. С. 1018–1025.
7. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. М.: Наука, 1977. 342 с.
8. Rowe J.F., Jr. A statistical summary of Arecibo nighttime E region observations // J. Geophys. Res. 1973. V. 78, N 28. P. 6811–6817. doi: 10.1029/JA078i028p06811.
9. Rowe J.F., Jr. Magnetic activity variations of the nighttime E region at Arecibo // Radio Sci. 1974. N 9. P. 175–182. doi: 10.1029/JA081i031p017517.
10. Shen J.S., Swartz W.E., Farley D.T., Harper R.M. Ionization layers in the nighttime E region valley above Arecibo // J. Geophys. Res. 1976. V. 81, N 31. P. 5517–5526.
11. Voss H.D., Smith L.G. Nighttime ionization by energetic particles at Wallops Island in the altitude region 120 to 200 km // Geophys. Res. Lett. 1979. V. 6, N 2. P. 93–96.
12. Batista I.S., de Paula E.R., Abdu M.A., Trivedi N.B., Greenspan M.E. Ionospheric effects of the March 13, 1989, magnetic storm at low and equatorial latitudes // J. Geophys. Res. A. 1991. V. 96, N 8. P. 13943–13952.
13. Bauske R., Noel S., Prölss G.W. Ionospheric storm effects in the nighttime E region caused by neutralized ring current particles // Ann. Geophys. 1997. V. 15, N 3. P. 300–305.
14. Smith L.G., Geller M.A., Voss H.D. Energetic electrons in midlatitude nighttime E-region // J. Atmos. Terr. Phys. 1974. V. 36, N 10. P. 1601–1612.
15. Slička M. The geometry of relativistic electron fluxes maxima during strong magnetic storms time according CORONAS-F data // Proc. of 21-st European Cosmic Ray Symposium. 9–12 September 2008. Koschau. Slovakia / Ed. by P. Kirbly, K. Kudela, M. Stehlik, A.W. Wolfendale. 2009. P. 188.
16. Rassoul H.K., Rohrbaugh R.P., Tinsley B.A., Slater D.W. Spectrometric and photometric observations of low-latitude aurorae // J. Geophys. Res. A. 1993. V. 98, N 5. P. 7695–7709.
17. Михалев А.В., Белецкий А.Б., Костылева Н.В., Черниговская М.А. Среднеширотные сияния на юге Восточной Сибири во время больших геомагнитных бурь 29–31 октября и 20–21 ноября 2003 г. // Космич. исслед. 2004. Т. 42, № 6. P. 616–621.
18. Омхольт А. Полярные сияния. М.: Мир, 1974. 248 с.
19. Hasegawa A. Particle acceleration by MHD surface wave and formation of aurorae // J. Geophys. Res. 1976. V. 81, N 28. P. 5083–5090.
20. Goertz C.K. Kinetic Alfvén waves on auroral field lines // Planet. Space Sci. 1984. V. 32. P. 1387–1392.
21. Leonovich A.S., Mazur V.A. Resonance excitation of standing Alfvén waves in an axisymmetric magnetosphere (monochromatic oscillations) // Planet. Space Sci. 1989. V. 37, N 9. P. 1095–1108.
22. Михалев А.В. Некоторые особенности наблюдений среднеширотных сияний и возмущений эмиссий верхней атмосферы во время магнитных бурь в регионе Восточной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14, № 10. С. 970–973.
23. Афраймович Э.Л., Яшкалев Я.Ф., Аушев В.М., Белецкий А.Б., Водяников В.В., Леонович Л.А., Лесюта О.С., Михалев А.В., Яковец А.Ф. Одновременные радиофизические и оптические измерения ионосферно-

го отклика во время большой магнитной бури 6 апреля 2000 г. // Геомагнет. и аэронаом. 2002. Т. 42, № 3. С. 383–393.

24. Дегтярев В.И., Михалев А.В., Jiyaо Xu. Вариации свечения ночного неба в Восточной Сибири в период маг-

нитной бури 31 марта – 4 апреля 2001 г. // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16, № 5–6. С. 552–556.

25. Алексеев В.Н., Иевенко И.Б. Широтная динамика SAR-дуг и ее связь с геомагнитной активностью // Геомагнет. и аэронаом. 1991. Т. 31, № 5. С. 938–940.

L.A. Leonovich, A.V. Mikhalev, A.V. Tashchilin, R.A. Rahmatulin, V.A. Leonovich, A.Yu. Pashinin.
The response of mid-latitude upper atmospheric parameters to January 21, 2005 geomagnetic storm as deduced from optical, magnetic and radio-physical measurements.

The paper examines the response of the upper atmosphere parameters to the unique geomagnetic storm on January 21, 2005 at middle latitudes. Measurement data of the OI 630 and OI 557.7 nm airglow intensities, the magnetospheric pulsations and ionospheric parameter variations obtained for the Eastern Siberia region (52 N, 103 E) are used for the analysis. Penetration of the global electric field into middle latitudes, geomagnetic pulsations with periods ranging from 0.2 to 1000 s, radio wave absorption in the D ionospheric region, the occurrence of sporadic auroral-type Es formations at altitudes of 140–200 km, and an increase in the intensity of the atmospheric 630 and 557.7 nm emission were observed during this storm. It has been suggested that, in this case, the disturbance of the mid-latitude upper atmosphere parameters might have been resulted from precipitations of energetic charged particles into the ionosphere. These precipitations took place during magnetosphere compression under the influence of enhanced dynamic pressure of the solar wind.