
ЭФФЕКТЫ ПОСЛЕДЕЙСТВИЙ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ: СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ

AFTER-EFFECTS OF GEOMAGNETIC STORMS: STATISTICAL ANALYSIS AND THEORETICAL EXPLANATION

К.Г. Раговский*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ratovsky@iszf.irk.ru***K.G. Ratovsky***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ratovsky@iszf.irk.ru***М.В. Клименко***Западное отделение Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
им. А.С. Пушкова РАН,
Калининград, Россия, maksim.klimenko@mail.ru
Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта,
Калининград, Россия, maksim.klimenko@mail.ru***M.V. Klimenko***West Department of Pushkov Institute of Terrestrial
Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,
Kaliningrad, Russia, maksim.klimenko@mail.ru
Immanuel Kant Baltic Federal University,
Kaliningrad, Russia, maksim.klimenko@mail.ru***В.В. Клименко***Западное отделение Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
им. А.С. Пушкова РАН,
Калининград, Россия, vvk_48@mail.ru***V.V. Klimenko***West Department of Pushkov Institute of Terrestrial
Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,
Kaliningrad, Russia, vvk_48@mail.ru***Н.В. Чирик***Западное отделение Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
им. А.С. Пушкова РАН,
Калининград, Россия, wsaad@mail.ru
Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта,
Калининград, Россия, wsaad@mail.ru***N.V. Chirik***West Department of Pushkov Institute of Terrestrial
Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,
Kaliningrad, Russia, wsaad@mail.ru
Immanuel Kant Baltic Federal University,
Kaliningrad, Russia, wsaad@mail.ru***Н.А. Коренькова***Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта,
Калининград, Россия, ninakoral@gmail.com***N.A. Korenkova***Immanuel Kant Baltic Federal University,
Kaliningrad, Russia, ninakoral@gmail.com***Д.С. Котова***Западное отделение Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
им. А.С. Пушкова РАН,
Калининград, Россия, darshu@yandex.ru
Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта,
Калининград, Россия, darshu@yandex.ru***D.S. Kotova***West Department of Pushkov Institute of Terrestrial
Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,
Kaliningrad, Russia, darshu@yandex.ru
Immanuel Kant Baltic Federal University,
Kaliningrad, Russia, darshu@yandex.ru*

Аннотация. Наши предыдущие исследования показали наличие положительных возмущений электронной концентрации в дневное время через несколько дней после начала фазы восстановления. Целью статьи является исследование эффектов последствий геомагнитных бурь, т. е. ионосферных эффектов, наблюдаемых на 3–5-й день после начала фазы восстановления бури. На основе численных расчетов с помощью модели ГСМ ТИП выявлены основные механизмы формирования эффектов последствий. С использованием данных ионозондов, расположенных в Иркутске (52° N, 104° E) и Калининграде (54° N, 20° E), проведен статистический анализ дневных ионосферных откликов на геомагнитные бури. В результате анализа получены усредненные ионосферные отклики в начале фазы восстановления бури и в течение пяти последующих дней. Результаты статистического анализа вблизи начала фазы восстановления хорошо согласуются с известными ионосферными эффектами геомагнитных бурь, выявленными другими исследователями. Впервые

Abstract. Our previous studies have shown the presence of daytime positive electron density disturbances during several days after the start of the recovery phase. The aim of this paper is to study after-effects of geomagnetic storms (after-storm effects), i.e. ionospheric effects observed on the 3–5th day after the beginning of the storm recovery phase. From numerical calculations with the GSM TIP model, we have found the main mechanisms for the formation of the after-storm effects. Using Irkutsk (52° N, 104° E) and Kaliningrad (54° N, 20° E) ionosonde data, we have carried out a statistical analysis of daytime ionospheric responses to geomagnetic storms. As a result of the analysis, we obtained averaged ionospheric responses at the beginning of the storm recovery phase and for five consecutive days. The statistical analysis results received near the beginning of the recovery phase are in good agreement with the well-known ionospheric effects of geomagnetic storms obtained in previous studies. For the first time, the obtained statistics of ionospheric responses observed on the 3–5th day after the beginning of the recovery phase

полученная статистика ионосферных откликов, наблюдаемых на 3–5-й день после начала фазы восстановления, позволила выявить зависимость эффектов последствий геомагнитных бурь от сезона, интенсивности бури и геомагнитной широты ионозонда. Также впервые в данной работе представлена физическая интерпретация формирования ионосферных эффектов последствий геомагнитных бурь, основанная на анализе результатов модельных расчетов.

Ключевые слова: геомагнитная буря, эффекты последствий геомагнитных бурь, статистика, модель ГСМ ТИП.

allowed us to reveal the dependence of after-storm ionospheric effects on season, storm intensity, and ionosonde geomagnetic latitude. In addition, we for the first time present the interpretation of after-storm ionospheric effects from numerical simulation results.

Keywords: geomagnetic storm, after-storm ionospheric effects, statistics, GSM TIP model.

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании ионосферных откликов на геомагнитные бури обычно рассматриваются возмущения, наблюдаемые на главной фазе бури, поскольку ионосферные возмущения наиболее интенсивны именно в этот период [Buonsanto, 1999; Mendillo, 2006; Prölss, 1995, 2008]. Отрицательные возмущения электронной концентрации в F-области ионосферы на начальных этапах фазы восстановления геомагнитных бурь являются одним из наиболее исследованных явлений [Prölss, 1995]. Напротив, положительные ионосферные возмущения на фазе восстановления геомагнитных бурь представляют собой наименее исследованную область отклика верхней атмосферы на геомагнитные бури, которая изучается только последние пять лет [Клименко и др., 2015; Balan et al., 2013; Suvorova et al., 2013]. Поведение же ионосферы на более поздних стадиях фазы восстановления и после окончания геомагнитной бури вообще практически не исследовалось. Однако модельные расчеты и наблюдения ионосферных эффектов геомагнитных бурь 26 сентября 2011 г. ($Dst = -118$ нТл) и 17 марта 2015 г. ($Dst = -223$ нТл) показали наличие достаточно интенсивных положительных возмущений электронной концентрации, которые наблюдались в дневное время на 3–5-й день после начала фазы восстановления геомагнитных бурь [Клименко и др., 2015; Klimenko et al., 2017, 2018]. Далее мы будем называть этот период фазой последствий геомагнитных бурь, а дневные ионосферные эффекты, наблюдающиеся на 3–5-й день после начала фазы восстановления бури, эффектами последствий геомагнитных бурь.

Расчеты параметров верхней атмосферы [Клименко и др., 2015; Klimenko et al., 2017, 2018] с использованием Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протонсферы (ГСМ ТИП) [Намгаладзе и др., 1990; Клименко и др., 2006; Korenkova et al., 1998] показали, что основной причиной положительных эффектов последствий является рост отношения концентрации атомарного кислорода к концентрации молекулярного азота $n(O)/n(N_2)$. Этот результат оказался неожиданным, поскольку хорошо известным эффектом на фазе восстановления геомагнитной бури является обрат-

ный эффект — уменьшение отношения $n(O)/n(N_2)$ и, как следствие, отрицательное возмущение электронной концентрации [Prölss, 1995]. На самом деле никакого противоречия между результатами расчетов модели ГСМ ТИП и общепринятыми представлениями нет: отрицательное возмущение $n(O)/n(N_2)$ характерно для главной фазы бури и первых дней фазы восстановления, тогда как положительное возмущение $n(O)/n(N_2)$ указывает на окончание фазы восстановления и является эффектом последствий геомагнитных бурь. Таким образом, возмущение $n(O)/n(N_2)$, равно как и возмущение электронной концентрации, подобно колебаниям маятника, переходит из отрицательной фазы в положительную в течение нескольких дней после начала фазы восстановления бури. Детальный анализ механизмов формирования эффектов последствий будет изложен в следующем разделе.

Ранее полученные результаты [Клименко и др., 2015; Klimenko et al., 2017, 2018] оставили открытым вопрос о том, являются ли эффекты последствий следствием особенностей сценариев рассмотренных геомагнитных бурь 26 сентября 2011 г. и 17 марта 2015 г., или же они характерны для всех геомагнитных бурь. Для ответа на этот вопрос был разработан специальный метод статистического анализа ионосферных откликов на геомагнитные бури на основе данных иркутского (52° N, 104° E) и калининградского (54° N, 20° E) ионозондов.

Таким образом, в статье решаются следующие задачи: а) проведение детального анализа механизмов формирования эффектов последствий; б) разработка метода статистического анализа ионосферных откликов на геомагнитные бури; в) исследование эффектов последствий на основе полученной статистики ионосферных откликов на геомагнитные бури.

МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭФФЕКТОВ ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ

Поскольку эффекты последствий являются дневными эффектами, в этом и следующих разделах будет проведен анализ дневных (усредненных в интервале 10–14 LT) возмущений ионосферных и термосферных параметров. В случае модельных расчетов под возмущениями подразумеваются отклонения рассматриваемых параметров от значений,

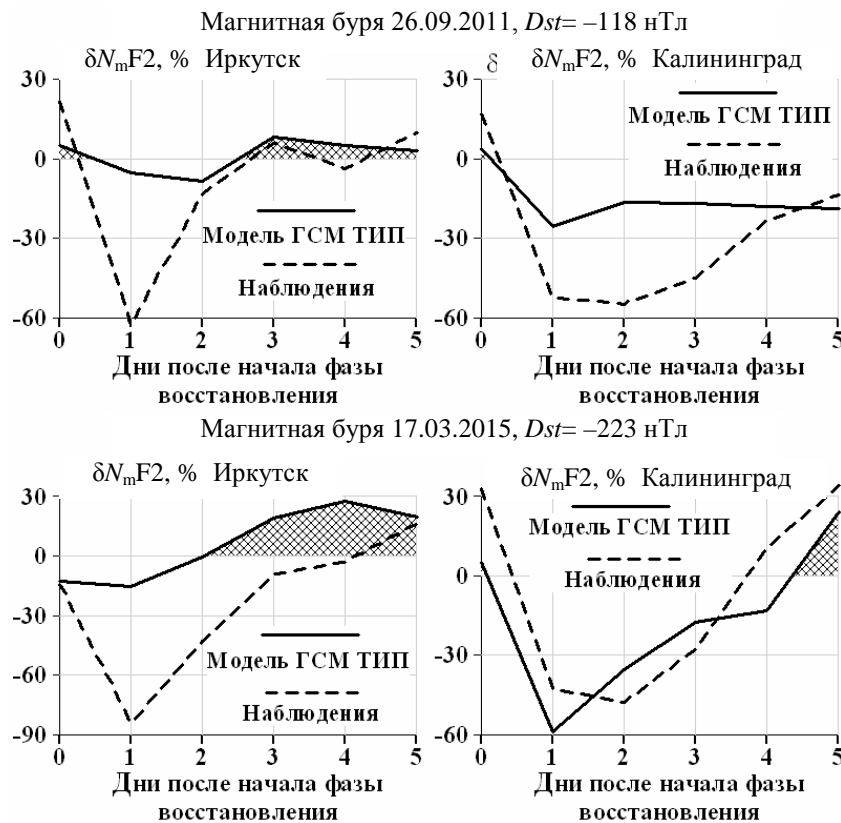


Рис. 1. Динамика возмущений $N_m F2$ в течение пяти дней после начала фазы восстановления согласно результатам расчетов по модели ГСМ ТИП (сплошные кривые) и данным наблюдений (штриховые кривые) над Иркутском (слева) и Калининградом (справа) для магнитных бурь 26 сентября 2011 г. (вверху) и 17 марта 2015 г. (внизу). Заштрихованы интервалы положительных возмущений согласно модельным расчетам

рассчитанных для спокойных условий, а в случае наблюдений — отклонения от медианных значений (27-дневных скользящих медиан) этих параметров. Для максимума электронной концентрации $N_m F2$, концентраций атомарного кислорода $n(O)$ и молекулярного азота $n(N_2)$ используются относительные отклонения $\delta N_m F2$, $\delta n(O)$ и $\delta n(N_2)$, %, а для меридиональной компоненты термосферного ветра V_n — абсолютные отклонения от спокойных значений ΔV_n , м/с. Предметом анализа является динамика возмущений на 6-дневном интервале: день 0 — начало фазы восстановления бури, а дни 1, ..., 5 — пять следующих дней.

На рис. 1 показана динамика возмущений $N_m F2$ согласно результатам расчетов по модели ГСМ ТИП и данным наблюдений над Иркутском и Калининградом для магнитных бурь 26 сентября 2011 г. и 17 марта 2015 г. Из рисунка видно, что практически для всех дней рассматриваемых бурь получено качественное согласие результатов модельных расчетов и данных наблюдений. Согласие расчетов и наблюдений улучшается по мере удаления от момента окончания активной фазы бури. На 3–5-й день после начала фазы восстановления наблюдается количественное согласие эффектов последствия по результатам модельных расчетов и данным наблюдений. При этом необходимо отметить, что в 1-й и 2-й дни после начала фазы восстановления результаты расчетов количественно не воспроизводят наблюдаемые возмущения $N_m F2$ над Калининградом

и Иркутском (модель заметно занижает амплитуду отрицательных возмущений $N_m F2$). Возможными причинами этого являются невысокая точность и задание в упрощенном виде таких входных параметров модели, как разность потенциалов поперек полярных шапок, положение границ полярных шапок, величина и положение продольных токов второй зоны, а также использование климатической модели высыпаний и, как следствие, их достаточно высокая неопределенность. Это не позволяет точно описать реальную динамику и пространственную структуру изменений параметров взаимосвязанной системы термосфера—ионосфера с учетом электродинамических процессов во время конкретного геомагнитного возмущения. Важно отметить также, что значительные отрицательные возмущения во время геомагнитных бурь, наблюдаемые на отдельных среднеширотных станциях в дневное время, являются труднопроизводимыми эффектами в большинстве исследований, проводимых на основе самосогласованных моделей. Причина этого кроется в изменениях источников и потерь ионизации (по нашему мнению, в основном последних) во время геомагнитных бурь. Чтобы получить именно те изменения состава нейтральной атмосферы, которые привели к реально наблюдавшимся ионосферным возмущениям, необходимо провести довольно нетривиальные исследования, поскольку причин расхождения результатов расчетов и наблюдений может быть достаточно много: а) недостаточно полный, а в отдельных случаях

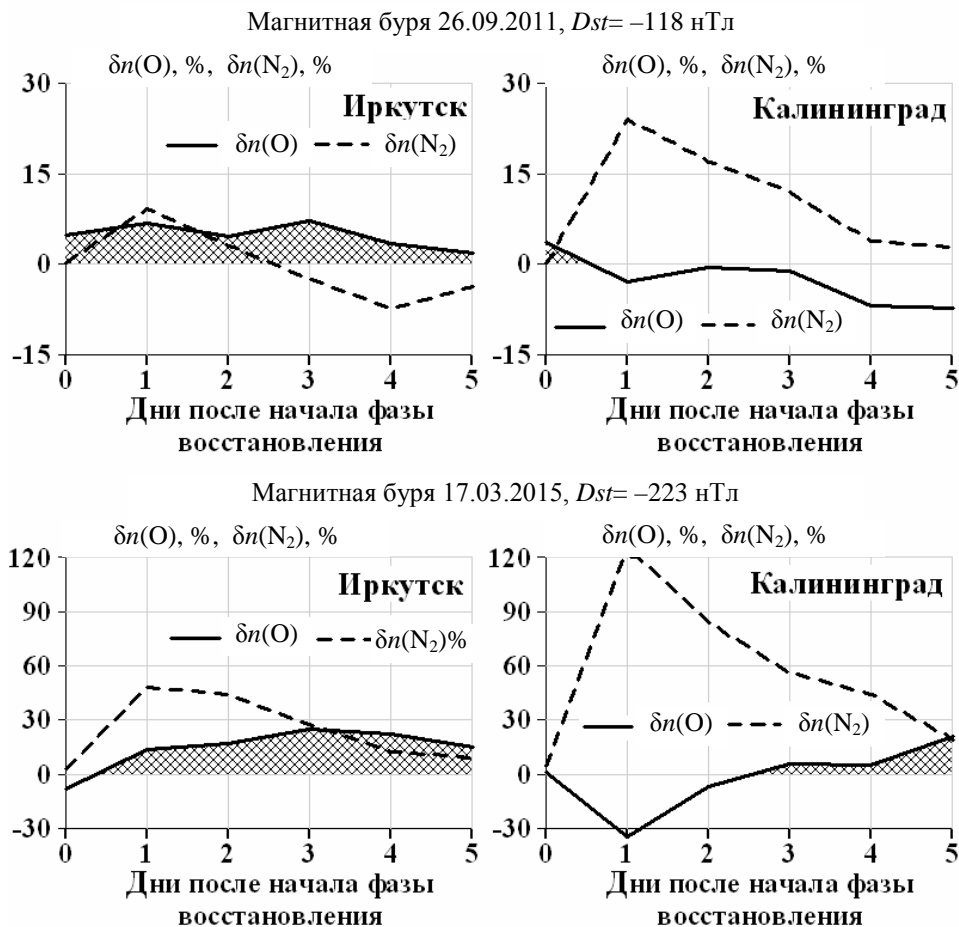


Рис. 2. Динамика возмущений $n(O)$ (сплошные кривые) и $n(N_2)$ (штриховые кривые) согласно результатам расчетов модели ГСМ ТИП над Иркутском (слева) и Калининградом (справа) для магнитных бурь 26 сентября 2011 г. (вверху) и 17 марта 2015 г. (внизу). Заштрихованы интервалы положительных возмущений $n(O)$

не совсем корректный учет колебательно-возбужденного молекулярного азота; б) неполный учет нагрева высокоширотной и авроральной ионосферы за счет высыпаний и джоулева нагрева из-за их неопределенности, о которой сказано выше.

На трех из четырех панелей (рис. 1) отчетливо видна картина перехода возмущений N_mF2 от отрицательной фазы к положительной, когда, собственно, и начинают наблюдаться положительные эффекты последействия. Отметим, что такая динамика δN_mF2 характерна как для модельных расчетов, так и для наблюдений. В одном из четырех представленных примеров возмущений N_mF2 (Калининград, буря 26 сентября 2011 г.) положительные эффекты последействия не реализуются, что опять-таки характерно как для модельных расчетов, так и для наблюдений. Возможные причины отсутствия положительных эффектов последействия обсуждаются в конце данного раздела.

Для выявления причин эффекта последействия (перехода возмущений N_mF2 от отрицательной фазы к положительной) были проанализированы вариации $\delta n(O)$, $\delta n(N_2)$ и ΔV_n на высоте 250 км, полученные на основе результатов расчетов по модели ГСМ ТИП. На рис. 2 показана динамика возмущений $n(O)$ и $n(N_2)$, полученных в модели ГСМ ТИП.

Динамика возмущений $n(N_2)$ похожа для обеих бурь на обеих станциях: в первый день после начала фазы восстановления (день 1) положительное возмущение достигает пика, после чего уменьшается. В одном из четырех случаев (Иркутск, буря 26 сентября 2011 г.) возмущения $n(N_2)$ переходят в отрицательную фазу. Характер возмущений $n(O)$ несколько различается для двух рассматриваемых станций. В случае Иркутска $\delta n(O)$ в основном положительное, с максимумом возмущения на третий день после начала фазы восстановления (день 3). В случае Калининграда для бури 17 марта 2015 г. $\delta n(O)$ монотонно возрастает, начиная со второго дня (день 2) после начала фазы восстановления, и достигает пика на пятый день (день 5). Для бури 26 сентября 2011 г. $\delta n(O)$ монотонно убывает с начального момента фазы восстановления. Эффект последействия (переход возмущения N_mF2 от отрицательной фазы к положительной) над Калининградом и Иркутском для 17 марта 2015 г. реализуется тогда, когда $\delta n(O)$ сравнивается с $\delta n(N_2)$. Для бури 26 сентября 2011 г. в случае Иркутска эффект последействия реализуется тогда, когда $\delta n(O)$ достигает пика, а $\delta n(N_2)$ переходит в отрицательную фазу. Таким образом, анализ вариаций $\delta n(O)$ и $\delta n(N_2)$ показывает, что причиной эффекта последействия является возрас-

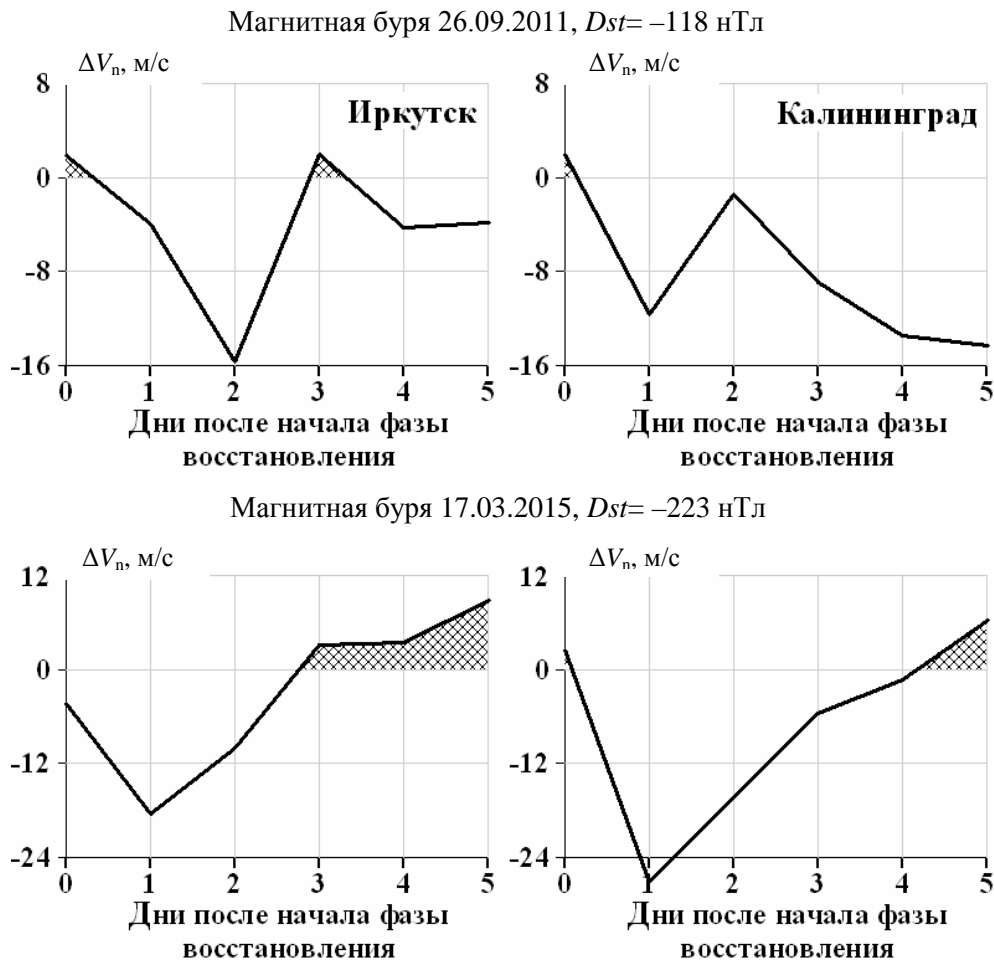


Рис. 3. Динамика возмущений V_n согласно результатам расчетов модели ГСМ ТИП над Иркутском (слева) и Калининградом (справа) для магнитных бурь 26 сентября 2011 г. (вверху) и 17 марта 2015 г. (внизу). Заштрихованы интервалы положительных возмущений V_n

тание $n(O)$ на фоне уменьшения $n(N_2)$, что приводит к формированию положительного возмущения в $n(O)/n(N_2)$ и, как следствие, в N_mF2 . При отсутствии положительной динамики в $n(O)$ (Калининград, буря 26 сентября 2011 г.) эффект последствия не наблюдается.

На рис. 3 показана динамика возмущений V_n , полученных в модели ГСМ ТИП. Положительное возмущение V_n означает усиление ветра, направленного от полюса к экватору (ведущее к росту N_mF2), а отрицательное возмущение — усиление ветра от экватора к полюсу (ведущее к уменьшению N_mF2). Из рис. 3 можно увидеть, что на фазе последствия возмущения ветра (как положительные, так и отрицательные) незначительные (не превышают 10 м/с), поэтому они не оказывают существенного влияния на возмущения N_mF2 . Тем не менее в случае бури 17 марта 2015 г. возмущения ветра усиливают положительное возмущение N_mF2 , возникающее за счет роста $n(O)/n(N_2)$, а в случае бури 26 сентября 2011 г. — ослабляют его. Важно отметить, что после более сильной геомагнитной бури 17 марта 2015 г. поведение возмущений ветра на обеих станциях носит схожий характер. Вначале в результате увеличения плотности нейтралов на низких широтах формируется ветер от экватора к полюсу. Затем возникает

обратный эффект, связанный, по-видимому, с инерционностью всей системы верхней атмосферы, что приводит к увеличению плотности нейтралов на более высоких широтах.

На рис. 4 приведена схема, объясняющая основные механизмы формирования возмущений N_mF2 , концентраций атомарного кислорода и молекулярного азота в главную фазу бури и на фазе последствия. Часть схемы, показывающая процессы в верхней атмосфере на начальной стадии и в главную фазу геомагнитной бури, является обобщением и некоторой модификацией схем и результатов, представленных в работах [Брюнелли, Намгаладзе, 1988; Maug et al., 1978]. В главную фазу бури происходит разогрев нижней термосферы в авроральных широтах за счет увеличения джоулева нагрева и усиления авроральных высыпаний. Это приводит к увеличению концентрации как молекулярного азота, так и атомарного кислорода в верхней термосфере и к переносу нейтральных частиц с высоких на средние и экваториальные широты. Количество нейтральных частиц, переносимых на более низкие широты, зависит от интенсивности и продолжительности главной фазы геомагнитной бури. Перенос молекулярного азота, как более тяжелого газа, охватывает авроральные и субавроральные широты. Перенос атомарного

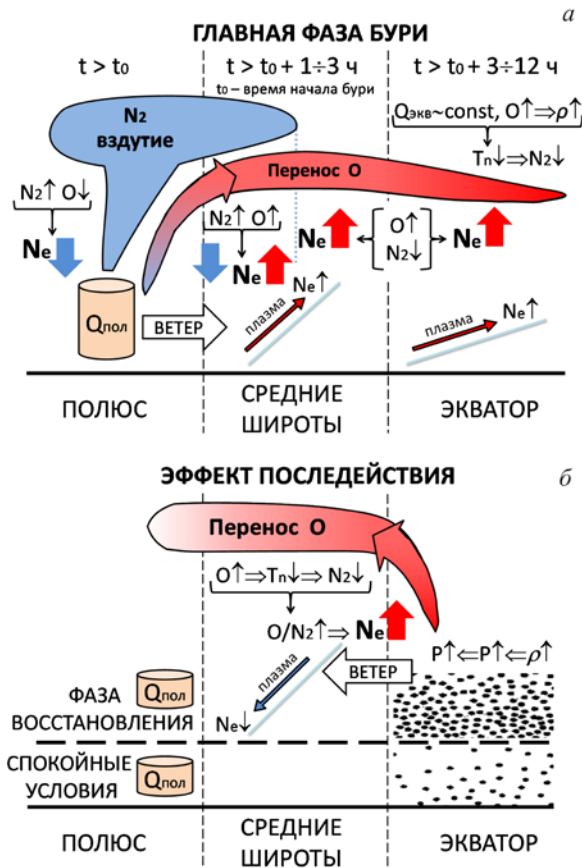


Рис. 4. Схема, объясняющая основные механизмы формирования возмущений концентраций атомарного кислорода и молекулярного азота, а также электронной концентрации на высотах F-области в главную фазу бури (а) и на фазе последствия (б)

кислорода, как более легкого газа, охватывает все широты вплоть до экваториальных. Увеличение плотности нейтрального газа на экваториальных широтах является дополнительным эффектом, который приводит к уменьшению температуры нейтралов и, как следствие, к уменьшению концентрации молекулярного азота в верхней термосфере. В итоге на этой стадии бури за счет изменения нейтрального состава происходит уменьшение (по сравнению со спокойными условиями) отношения $n(O)/n(N_2)$ и $N_m F2$ на авроральных и субавроральных широтах [Брюнелли, Намгаладзе, 1988; Maug et al., 1978] и рост отношения $n(O)/n(N_2)$ и $N_m F2$ на низких, приэкваториальных и средних широтах [Клименко и др., 2011; Данилов, 2013; Field, Rishbeth, 1997; Maug et al., 1978]. На эти возмущения также накладываются дневные положительные возмущения $N_m F2$, вызванные направленным к экватору термосферным ветром, наиболее эффективным на средних широтах, и эффекты горизонтального и вертикального $E \times B$ -дрейфа плазмы [Тащилин, 2014; Кринберг, Тащилин, 1984; Брюнелли, Намгаладзе, 1988]. Однако перенос плазмы не приводит к заметным эффектам на фазе последствия и поэтому нами детально не рассматривается.

На фазе последствия из-за повышенной плотности нейтрального газа на экваториальных и низких широтах возникает дополнительный градиент

давления от экватора к полюсу и происходит процесс обратный тому, что имел место в главную фазу геомагнитной бури: атомарный кислород переносится от экваториальных широт к средним и авроральным, что приводит к увеличению $n(O)$ на этих широтах. Увеличение плотности нейтрального газа на средних и авроральных широтах является дополнительным эффектом, который приводит к уменьшению температуры и, как следствие, к уменьшению концентрации молекулярного азота в верхней термосфере.

В итоге на фазе последствия можно ожидать возрастания (по сравнению со спокойными условиями) отношения $n(O)/n(N_2)$ и $N_m F2$ в широтной области, охватывающей либо экваториальные, средние и субавроральные широты, либо экваториальные и часть средних широт. Положение «высокоширотной» границы этой пространственной области зависит от широтного градиента плотности нейтралов, возникшего в результате геомагнитной бури, условий переноса атомарного кислорода из низких широт в более высокие и остаточного положительного возмущения $n(N_2)$. При этом широтный диапазон появления эффекта последствия, как и само появление этого эффекта, должны зависеть от многих факторов, таких как сезон, интенсивность и продолжительность геомагнитной бури, долгота, солнечная активность и т. д.

МЕТОД СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИОНОСФЕРНЫХ ОТКЛИКОВ НА ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ

Идентификация геомагнитных бурь с использованием базы данных геомагнитных индексов была реализована с помощью следующего алгоритма. Событие рассматривалось как магнитная буря при выполнении следующих условий:

1) $Dst(t_0)$ является наименьшим значением Dst на временном интервале $t_0 \pm 12$ ч;

2) $Dst(t_0) \leq -50$ нТл,

где t_0 — время, соответствующее концу главной фазы и началу фазы восстановления геомагнитной бури. Все бури были разделены на четыре типа: изолированные (временной интервал между соседними бурями $t_0 \geq 5$ дней); неизолированные (указанный интервал не превышает 5 дней); слабые ($Dst(t_0) > -100$ нТл) и сильные ($Dst(t_0) \leq -100$ нТл). В каждой группе бури делились по сезонам: зима (декабрь—февраль); весна (март—май); лето (июнь—август) и осень (сентябрь—ноябрь).

Статистика дневных ионосферных откликов на геомагнитные бури рассчитывалась на основе следующего метода. В качестве возмущений электронной концентрации F2-слоя ионосферы ($\Delta N_m F2$) рассматривались отклонения (в %) наблюдаемых значений ($N_m F2_{obs}$) от 27-дневных скользящих медиан ($N_m F2_{med}$):

$$\Delta N_m F2 = (N_m F2_{obs} - N_m F2_{med}) / N_m F2_{med} \cdot 100 \%$$

Для анализа дневных ионосферных возмущений были рассчитаны среднедневные (в интервале 10–14 LT) значения $\Delta N_m F2$. Расчеты проводились для дня,

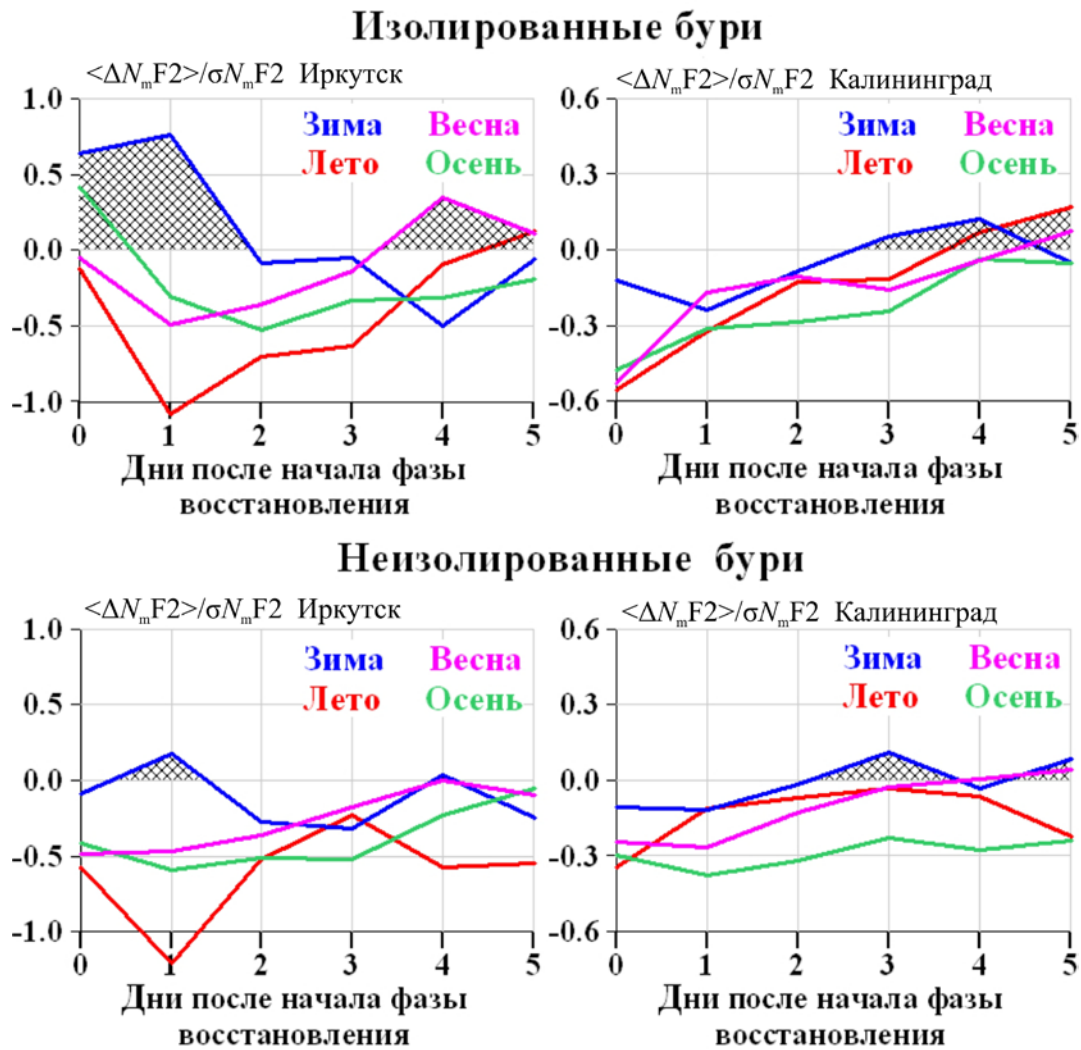


Рис. 5. Вариации отношения R в течение пяти дней после начала фазы восстановления для изолированных (вверху) и неизолированных (внизу) бурь в Иркутске (слева) и Калининграде (справа). Синими, пурпурными, красными и зелеными кривыми показаны результаты, полученные для зимы, весны, лета и осени соответственно. Заштрихованы интервалы положительных значений $\langle \Delta N_m F2 \rangle / \sigma N_m F2$

соответствующего t_0 (день 0), и пяти следующих дней (день 1, ..., 5). Для каждой ячейки, соответствующей данному типу бури, сезону и дню после t_0 , рассчитывались средние значения $\Delta N_m F2$ ($\langle \Delta N_m F2 \rangle$) и среднеквадратичные отклонения $\sigma N_m F2$, а также отношения $R = \langle \Delta N_m F2 \rangle / \sigma N_m F2$. Параметр R является аналогом отношения сигнал/шум, который показывает отношение детерминированной составляющей процесса (в данном случае — среднее значение) к случайной составляющей процесса (в данном случае — среднеквадратичное отклонение).

Анализируемые данные иркутского ионозонда охватывают период 2003–2016 гг. Период включает в себя 291 магнитную бурю (98 изолированных, 193 неизолированных, 249 слабых и 42 сильных бури). Анализируемые данные калининградского ионозонда охватывают период 1964–2016 гг. (с пропуском 1997–2006 гг.) и включают 1808 магнитных бурь (684 изолированных, 1124 неизолированных, 1489 слабых и 319 сильных бурь). Влияние солнечной активности на ионосферный эффект магнитной бури в нашей статье не рассматривалось.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 5 показаны вариации отношения R в течение пяти дней после начала фазы восстановления для изолированных и неизолированных бурь в Иркутске и Калининграде. То же самое, но для слабых и сильных бурь, показано на рис. 6.

Начало фазы восстановления (дни 0–2)

Фаза восстановления в основном характеризуется наличием систематических отрицательных возмущений $N_m F2$ (отрицательные значения R). Отрицательные возмущения $N_m F2$ обусловлены разогревом нижней термосферы в авроральных широтах, увеличением концентрации молекулярного азота в верхней термосфере и переносом возмущенного нейтрального компонента на средние широты. Как для Иркутска, так и для Калининграда наибольшие по абсолютной величине отрицательные значения R наблюдаются летом, а наименьшие (положительные

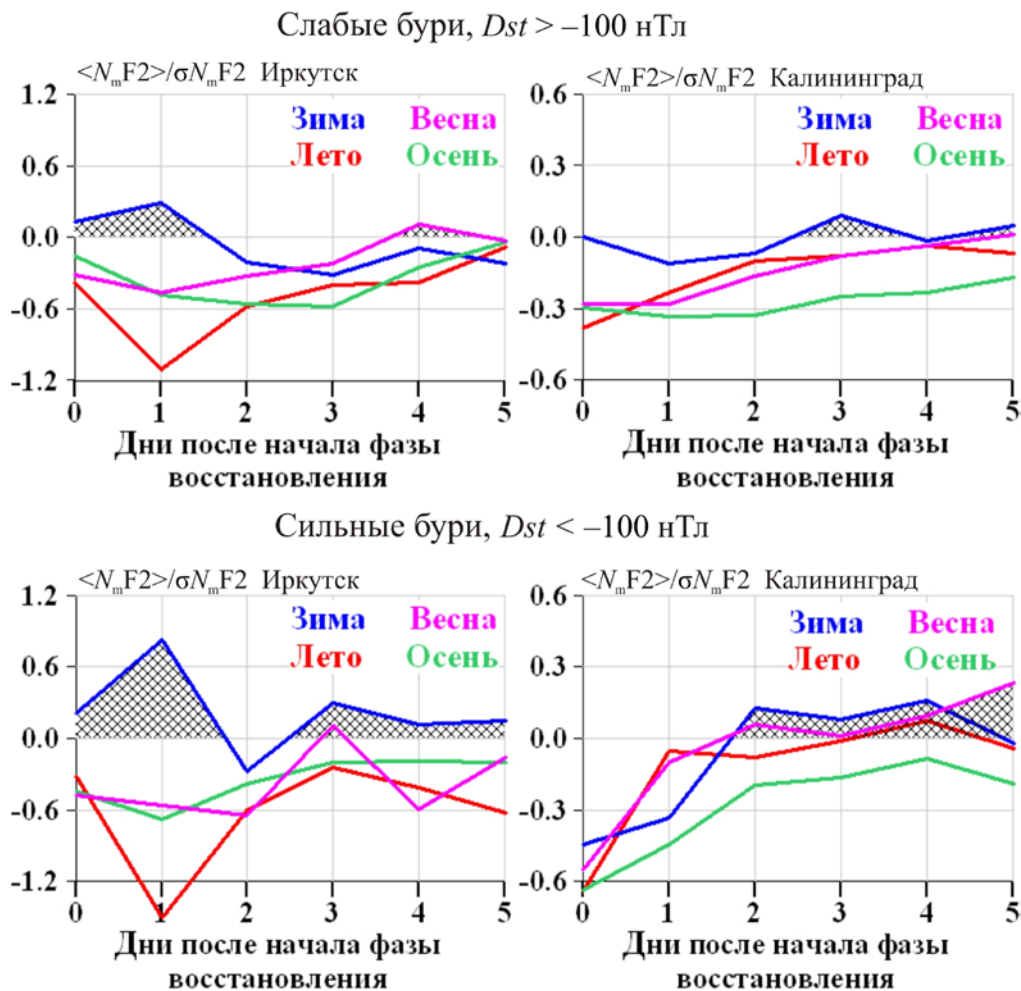


Рис. 6. То же, что на рис. 5, но для слабых и сильных бурь

в случае Иркутска) — в зимний период. Такая картина полностью укладывается в известную концепцию [Buonsanto, 1999; Mikhailov, 2000; Pröls, 1993] сезонной зависимости ионосферного отклика на геомагнитные бури. Фоновый дневной ветер, направленный от экватора к полюсу, препятствует проникновению возмущенной нейтральной составляющей от высоких широт к средним, что приводит к ослаблению отрицательных эффектов геомагнитных бурь. Зимой дневной ветер сильнее, чем летом, поэтому эффект ослабления отрицательных возмущений выражен сильнее. Ослабление дневного ветра само по себе приводит к положительным эффектам, которые лучше проявляются зимой из-за более сильного, чем летом, влияния ветра на электронную концентрацию. Тот факт, что положительные эффекты в начале фазы восстановления наблюдаются только в Иркутске, по-видимому, объясняется большей геомагнитной широтой Калининграда и, как следствие, более близким расположением относительно источников возмущений нейтральной составляющей в авроральных широтах.

Фаза последствия (дни 3–5)

В отличие от начала фазы восстановления, общие черты и различия между Калининградом и

Иркутском на фазе последствия не столь очевидны. Наибольший положительный эффект в обоих случаях наблюдался весной, однако в Иркутске он характерен для изолированных магнитных бурь, а в Калининграде — для сильных магнитных бурь. Можно также отметить заметные положительные эффекты летом для изолированных магнитных бурь в случае Калининграда и зимой для сильных магнитных бурь в случае Иркутска. Таким образом, общая особенность для обеих станций заключается в том, что положительные эффекты последствия наиболее заметны в случае изолированных или сильных магнитных бурь. В случае неизоллированных магнитных бурь эффекты начала фазы восстановления накладываются на эффекты последствия, что приводит к нивелированию положительных эффектов на фазе последствия. В случае слабых магнитных бурь эффекты последствия, по всей видимости, выражены заметно слабее, чем в случае сильных бурь, что согласуется с результатами модельных расчетов (рис. 1), которые показывают, что эффекты последствия выражены сильнее для более сильной бури.

Другая общая для обеих станций закономерность состоит в том, что на фазе последствия наибольшие положительные эффекты никогда не наблюдаются

осенью, а наибольшие отрицательные эффекты — весной. Таким образом, в отличие от начала фазы восстановления, противоположные сезонные эффекты наблюдаются весной и осенью, а не зимой и летом. С одной стороны, такая закономерность согласуется с результатами модельных расчетов (см. рис. 1), которые показывают, что эффекты последствия сильнее выражены для весенней бури, чем для осенней. С другой стороны, как было сказано выше, различия можно объяснить тем, что осенняя буря была слабей, чем весенняя (см. рис. 1). Таким образом, вопрос теоретического обоснования того факта, что наиболее благоприятные условия для положительных эффектов последствия геомагнитных бурь создаются весной, остается открытым. Следует еще раз отметить, что проведенные ранее модельные расчеты ионосферных откликов на магнитные бури [Клименко и др., 2015; Klimenko et al., 2017, 2018] показали, что положительное последствие может наблюдаться как в осенний, так и в весенний период.

Соотношение детерминированной и случайной компонент ионосферного отклика

Отношение R показывает, насколько велика средняя величина эффекта последствия относительно случайного распределения изменений $N_m F2$. Как видно из рис. 5, 6, это отношение невелико: в начале фазы восстановления R порядка 1, а на фазе последствия R не превышает 0.35. Случайная составляющая ионосферного отклика обусловлена взаимодействием процессов, вызванных собственно магнитной бурей, с процессами, связанными со всеми видами солнечной и атмосферной активности. Например, результаты работы [Pedatella, 2016] показывают сопоставимую роль эффектов экстремальной геомагнитной бури и мощного внезапного стратосферного потепления 2009 г. Такой характер ионосферного отклика усложняет статистический анализ, особенно на фазе последствия, где эффекты бури заметно слабее, чем в начале фазы восстановления. Тем не менее статистические результаты для начала фазы восстановления хорошо согласуются с известной концепцией сезонной зависимости ионосферного отклика на геомагнитные бури. Что касается фазы последствия, то ее исследование требует дальнейших усилий, связанных как с моделированием, так и с совершенствованием метода статистического анализа. В любом случае в данной статье представлены первые статистические результаты, дающие представление о возникновении дневных положительных ионосферных эффектов, наблюдаемых на 3–5-й день после начала фазы восстановления геомагнитной бури.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель данной статьи состояла в исследовании положительных возмущений электронной концентрации, наблюдаемых в дневное время на 3–5-й день после начала фазы восстановления геомагнитной бури, которые мы назвали эффектами последствия геомагнитных бурь.

На основе численных расчетов с использованием модели ГСМ ТИП были проанализированы основные механизмы формирования эффектов после-

действия. Показано, что основной причиной наблюдаемых положительных возмущений электронной концентрации является увеличение концентрации атомарного кислорода за счет его переноса от экваториальных широт к средним на фазе последствия. В свою очередь, этот перенос обусловлен дополнительным градиентом давления нейтрального газа от низких широт к высоким, возникающим в результате появления избыточной плотности нейтрального газа на низких широтах в главную фазу геомагнитной бури за счет переноса кислорода от авроральных широт в сторону экватора.

С использованием данных иркутского (52° N, 104° E) и калининградского (54° N, 20° E) ионозондов проведен статистический анализ дневных ионосферных откликов на геомагнитные бури. Основные результаты выглядят следующим образом. Статистика вблизи начала фазы восстановления хорошо согласуется с известными эффектами геомагнитных бурь. Впервые полученная статистика ионосферных откликов на фазе последствия позволила выявить две основные закономерности:

1) положительные эффекты последствия наиболее заметны в случае изолированных или сильных геомагнитных бурь;

2) наиболее благоприятным сезоном для положительных эффектов последствия является весна, а наименее благоприятным — осень.

Первая закономерность объясняется отсутствием наложения отрицательных эффектов, формирующихся в начале фазы восстановления, на эффекты последствия для изолированных бурь и тем, что в случае слабых магнитных бурь эффекты последствия выражены заметно слабее, чем в случае сильных бурь, что согласуется с результатами модельных расчетов. Вопрос теоретического обоснования второй закономерности в настоящее время остается открытым.

Статистический анализ показал, что соотношение детерминированной и случайной компонент ионосферного отклика в начале фазы восстановления порядка 1, а на фазе последствия не превышает 0.35. Случайная составляющая ионосферного отклика обусловлена взаимодействием процессов, вызванных собственно магнитной бурей, и процессов, связанных со всеми видами атмосферной активности. Таким образом, исследование ионосферных эффектов на фазе последствия требует дальнейших усилий, связанных как с проведением модельных расчетов, так и с совершенствованием метода статистического анализа.

Исследование (модельные расчеты и их анализ, статистическая обработка данных наблюдений) выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00594. Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>]. Экспериментальные данные и методы обработки данных получены в рамках базового финансирования программы ФНИ П.12. Работа с базой данных калининградского ионозонда выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности «5–100» БФУ им. И. Канта. Авторы

выражают благодарность Центру данных по физике космоса НАСА (NASA's Space Physics Data Facility, SPDF) за возможность использования геомагнитных индексов с веб-сайта [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
- Данилов А.Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения (обзор) // Гелиогеофизические исследования. 2013. № 5. С. 1–33.
- Клименко В.В., Клименко М.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли — постановка задачи и тестовые расчеты // Математическое моделирование. 2006. Т. 18, № 3. С. 77–92.
- Клименко М.В., Клименко В.В., Ратовский К.Г., Гончаренко Л.П. Ионосферные эффекты последовательности геомагнитных бурь 9–14 сентября 2005 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2011. Т. 51, № 3. С. 368–380.
- Клименко М.В., Клименко В.В., Бессараб Ф.С. и др. Влияние геомагнитных бурь 26–30 сентября 2011 г. на ионосферу и распространение радиоволн КВ-диапазона. I. Ионосферные эффекты // Геомагнетизм и аэронавигация. 2015. Т. 55, № 6. С. 769–789. DOI: [10.7868/S0016794015050077](https://doi.org/10.7868/S0016794015050077).
- Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984. 129 с.
- Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В. и др. Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. 1990. Т. 30, № 4. С. 612–619.
- Тащилин А.В. Формирование крупномасштабной структуры ионосферы в спокойных и возмущенных условиях: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 25.00.29. Иркутск, 2014. 236 с.
- Balan N., Otsuka Y., Nishioka M., et al. Physical mechanisms of the ionospheric storms at equatorial and higher latitudes during the recovery phase of geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 2660–2669. DOI: [10.1002/jgra.50275](https://doi.org/10.1002/jgra.50275).
- Buonsanto M.J. Ionospheric storms: a review // *Space Sci. Rev.* 1999. V. 88, N 3–4. P. 563–601. DOI: [10.1023/A:105107532631](https://doi.org/10.1023/A:105107532631).
- Field P.R., Rishbeth H. The response of the ionospheric F2-layer to geomagnetic activity: an analysis of worldwide data // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1997. V. 59, N 2. P. 163–180. DOI: [10.1016/S1364-6826\(96\)00085-5](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(96)00085-5).
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., et al. Similarity and differences in morphology and mechanisms of the f_oF_2 and TEC disturbances during the geomagnetic storms on 26–30 September 2011 // *Ann. Geophys.* 2017. V. 35. P. 923–938. DOI: [10.5194/angeo-35-923-2017](https://doi.org/10.5194/angeo-35-923-2017).
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V., et al. Disturbances of the thermosphere—ionosphere—plasmasphere system and auroral electrojet at 30° E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015 // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.12.017](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.12.017). (In print).
- Korenkov Y.N., Klimenko V.V., Forster M., et al. Calculated and observed ionospheric parameters for Magion-2 passage above EISCAT on July 31 1990 // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103, N A7. P. 14,697–14,710. DOI: [10.1029/98JA00210](https://doi.org/10.1029/98JA00210).
- Mayr H.G., Harris I., Spencer N.W. Some properties of upper atmosphere dynamics // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1978. V. 16. P. 539–565. DOI: [10.1029/RG016i004p00539](https://doi.org/10.1029/RG016i004p00539).
- Mendillo M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content // *Rev. Geophys.* 2006. V. 44. RG4001. DOI: [10.1029/2005RG000193](https://doi.org/10.1029/2005RG000193).

Mikhailov A.V. Ionospheric F2-layer storms // *Fisica de la Tierra*. 2000. V. 12. P. 223–262.

Pedatella N.M. Impact of the lower atmosphere on the ionosphere response to a geomagnetic superstorm // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43, iss. 18. P. 9383–9389. DOI: [10.1002/2016GL070592](https://doi.org/10.1002/2016GL070592).

Prölss G.W. On explaining the local time variation of ionospheric storm effects // *Ann. Geophys.* 1993. V. 11, N 1. P. 1–9.

Prölss G.W. Ionospheric F-region storms // *Handbook of Atmospheric Electrodynamics II* / Eds. H. Volland. Boca Raton: CRC Press, 1995. P. 195–248.

Prölss G.W. Ionospheric storms at mid-latitudes: a short review // *Midlatitude Ionospheric Dynamics and Disturbances* / Eds. Kintner P.M. et al. Washington, 2008. P. 9–24. (*Geophys. Monograph Ser.* V. 181). DOI: [10.1029/181GM03](https://doi.org/10.1029/181GM03).

Suvorova A.V., Dmitriev A.V., Tsai L.-C., et al. TEC evidence for near-equatorial energy deposition by 30 keV electrons in the topside ionosphere // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 4672–4695. DOI: [10.1002/jgra.50439](https://doi.org/10.1002/jgra.50439).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 8 сентября 2018 г.).

URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> (дата обращения 8 сентября 2018 г.).

REFERENCES

- Brunelli B.E., Namgaladze A.A. Fizika ionosfery [Physics of the ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 528 p. (In Russian).
- Buonsanto M.J. Ionospheric storms: a review. *Space Sci. Rev.* 1999, vol. 88, no. 3–4, pp. 563–601. DOI: [10.1023/A:1005107532631](https://doi.org/10.1023/A:1005107532631).
- Balan N., Otsuka Y., Nishioka M., Liu J.Y., Bailey G.J. Physical mechanisms of the ionospheric storms at equatorial and higher latitudes during the recovery phase of geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2013, vol. 118, pp. 2660–2669. DOI: [10.1002/jgra.50275](https://doi.org/10.1002/jgra.50275).
- Danilov A.D. Reaction of F region to geomagnetic disturbances (review). *Geliogeofizicheskie issledovaniya* [Helio-geophys. Res.]. 2013, no. 5, pp. 1–33. (In Russian).
- Field P.R., Rishbeth H. The response of the ionospheric F2-layer to geomagnetic activity: an analysis of worldwide data. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1997, vol. 59, no. 2, pp. 163–180. DOI: [10.1016/S1364-6826\(96\)00085-5](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(96)00085-5).
- Klimenko V.V., Klimenko M.V., Bryukhanov V.V. Numerical simulation of the electric field and zonal current in the Earth's ionosphere — problem statement and test calculations. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2006, vol. 18, no. 3, pp. 77–92. (In Russian).
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Goncharenko L.P. Ionospheric effects caused by the series of geomagnetic storms of September 9–14, 2005. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2011, vol. 51, no. 3, pp. 364–376. DOI: [10.1134/S0016793211030108](https://doi.org/10.1134/S0016793211030108).
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessaraб F.S., Ratovsky K.G., Zakharenkova I.E., Nosikov I.A., Stepanov A.E., Kotova D.S., Vorobjev V.G., Yagodkina O.I. Influence of geomagnetic storms of September 26–30, 2011, on the ionosphere and HF radiowave propagation. I. Ionospheric effects. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015, vol. 55, no. 6, pp. 744–762. DOI: [10.1134/S0016793215050072](https://doi.org/10.1134/S0016793215050072).
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Ratovsky K.G., Korenkova N.A., Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Cherniak Iu.V. Similarity and differences in morphology and mechanisms of the f_oF_2 and TEC disturbances during the geomagnetic storms on 26–30 September 2011. *Ann. Geophys.* 2017, vol. 35, pp. 923–938. DOI: [10.5194/angeo-35-923-2017](https://doi.org/10.5194/angeo-35-923-2017).
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V., Zakharenkova I.E., Kozelov B.V., Cherniakov S.M., Andreeva E.S., Tereshchenko E.D., Vesnin A.M., Korenkova N.A., Gomonov A.D., Vasiliev E.B., Ratovsky K.G. Disturbances of the

thermosphere—ionosphere—plasmaphere system and auroral electrojet at 30° E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.12.017](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.12.017). (In print).

Korenkov Y.N., Klimenko V.V., Forster M., Bessarab F.S., Surotkin V.A. Calculated and observed ionospheric parameters for Magion-2 passage above EISCAT on July 31 1990. *J. Geophys. Res.* 1998, vol. 103, no. A7, pp. 14,697–14,710. DOI: [10.1029/98JA00210](https://doi.org/10.1029/98JA00210).

Krinberg I.A., Tashchilin A.V. *Ionosfera i plazmosfera* [Ionosphere and Plasmasphere]. Moscow, Nauka, 1984, 129 p. (In Russian).

Mayr H.G., Harris I., Spencer N.W. Some properties of upper atmosphere dynamics. *Rev. Geophys. Space Phys.* 1978, vol. 16, pp. 539–565. DOI: [10.1029/RG016i004p00539](https://doi.org/10.1029/RG016i004p00539).

Mendillo M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. *Rev. Geophys.* 2006, vol. 44, RG4001. DOI: [10.1029/2005RG000193](https://doi.org/10.1029/2005RG000193).

Mikhailov A.V. Ionospheric F2-layer storms. *Fisica de la Tierra.* 2000, vol. 12, pp. 223–262.

Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Bessarab F.S., Surotkin V.A., Glushchenko T.A., Naumova N.M. Global numerical model of the Earth's thermosphere, ionosphere and protonosphere. *Geomagnetism and Aeronomy.* 1990, vol. 30, no. 4, pp. 612–619. (In Russian).

Pedatella N.M. Impact of the lower atmosphere on the ionosphere response to a geomagnetic superstorm. *Geophys. Res. Lett.* 2016, vol. 43, iss. 18, pp. 9383–9389. DOI: [10.1002/2016GL070592](https://doi.org/10.1002/2016GL070592).

Prölss G.W. On explaining the local time variation of ionospheric storm effects. *Annales Geophysicae.* 1993, vol. 11, no. 1, pp. 1–9.

Prölss G.W. Ionospheric F-region storms. *Handbook of Atmospheric Electrodynamics.* 1995, pp. 195–248.

Prölss G.W. Ionospheric storms at mid-latitudes: a short review. *Midlatitude Ionospheric Dynamics and Disturbances.* 2008, pp. 9–24. (Geophys. Monograph Ser., vol. 181). DOI: [10.1029/181GM03](https://doi.org/10.1029/181GM03).

Suvorova A.V., Dmitriev A.V., Tsai L.-C., Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Nesterov I.A., Lazutin L.L. TEC evidence for near-equatorial energy deposition by 30 keV electrons in the topside ionosphere. *J. Geophys. Res.* 2013, vol. 118, pp. 4672–4695. DOI: [10.1002/jgra.50439](https://doi.org/10.1002/jgra.50439).

Tashchilin A.V. *Formirovaniye krupnomasshtabnoi struktury ionosfery v spokoinykh i vozmushchennykh usloviyakh* [Formation of large-scale structure of the ionosphere in quiet and disturbed conditions. Dr. Phys. & Math. Sci. Diss.]. Irkutsk, 2014, 236 p. (In Russian).

URL: <https://www.esrl.noaa.gov/psd> (accessed September 8, 2018).

URL: <https://www.esrl.noaa.gov/psd> (accessed September 8, 2018).

Как цитировать эту статью

Ратовский К.Г., Клименко М.В., Клименко В.В., Чирик Н.В., Коренькова Н.А., Котова Д.С. Эффекты последствий геомагнитных бурь: статистический анализ и теоретическое объяснение. *Солнечно-земная физика.* 2018. Т. 4, № 4. С. 32–42. DOI: [10.12737/szf-44201804](https://doi.org/10.12737/szf-44201804).