

## Возмущения термосферного молекулярного газа и их связь с долготными неоднородностями ионосферных возмущений в Северном полушарии во время геомагнитной бури

М. А. Черниговская, Б. Г. Шпынев, А. С. Ясюкевич, Д. С. Хабитуев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664033, Россия*

*E-mail: cher@iszf.irk.ru*

Исследовано предположение, что низкие значения ионизации на фазе восстановления магнитной бури в соседних по долготе областях ионосферы могут быть обусловлены распространением в западном направлении атмосферной волны нейтрального газа с низким содержанием отношения  $[O]/[N_2]$ . Для анализа были использованы спутниковые измерения GUVI TIMED атмосферных составляющих на высотах термосферы (ионосферы) выше  $\sim 100$  км. В связи с особенностями орбиты спутника TIMED исследовались только медленные, межсуточные вариации параметра  $[O]/[N_2]$ , связанные с изменением химического состава на высотах ионосферы. Выполнен спектральный анализ долготных вариаций геомагнитного поля на основе данных среднеширотной цепи магнитометров INTERMAGNET в Северном полушарии в период магнитной бури в марте 2015 г. Отмечено возрастание амплитуды низкочастотной составляющей спектра вариаций  $H$ -компоненты геомагнитного поля за несколько часов перед событиями уменьшения  $[O]/[N_2]$  в столбе термосферного газа выше  $\sim 100$  км. Обсуждается возможная связь медленных вариаций компонент геомагнитного поля с долготными неоднородностями ионосферных возмущений в период геомагнитной бури.

**Ключевые слова:** цепи ионозондов и магнитометров, ионосферные возмущения, геомагнитная буря, вариации газового состава термосферы

Одобрена к печати: 31.08.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-295-304

### Введение

Цель статьи заключается в экспериментальном исследовании пространственно-временных вариаций параметров ионосферы, связанных с возмущениями в магнитосфере Земли, которые определяются в первую очередь проявлениями солнечной активности (Dudok de Wit, Watermann, 2009). Вследствие сложных процессов взаимодействия высокоэнергетического солнечного ветра с геомагнитным полем (ГМП) происходят возмущения его напряжённости — геомагнитные бури, выступающие ярким проявлением гелио-геомагнитной активности. В периоды магнитных бурь в ионосфере развивается целый комплекс сложных процессов (так называемые ионосферные бури), в результате которых существенно изменяются её параметры. Магнитные бури обычно вызывают значительные отклонения электронной плотности ионосферы от их нормальных значений в геомагнитно спокойные дни. Этот эффект проявления ионосферных бурь вызывал большой интерес в течение многих десятилетий (Buonsanto, 1999; Fuller-Rowell et al., 1994; Prölss, 1995; Schunk, Sojka, 1996). В работе (Seaton, 1956) впервые было сделано предположение, что уменьшение электронной плотности может быть связано с составом термосферного нейтрального газа.

При исследовании влияния геомагнитных возмущений на ионосферу Земли традиционным определяющим фактором является воздействие на ионизованную часть земной атмосферы наведённых внешних магнитосферных полей, которое начинает играть важную роль в атмосферо-ионосферном взаимодействии, начиная с высот  $\sim 90$  км и выше.

К настоящему времени хорошо известно, что ионосферные эффекты магнитных бурь во многом связаны с возмущениями в термосфере, вызываемыми усилением западной авроральной электроструи в области высоких широт. Интенсивный джоулев нагрев и высыпания энергичных частиц в авроральной атмосфере в области высот порядка 100 км и выше генерируют сильные термосферные ветры и турбулентность. Индуцированные нейтральные ветры

перераспределяют нейтральный состав атмосферы по большей части региона высоких широт и части региона средних широт. Кислород, как более лёгкий газ, подвержен более сильному переносу по сравнению с азотом. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению отношения  $[O]/[N_2]$  на высотах верхней атмосферы и, как следствие, к отрицательным возмущениям электронной концентрации в  $F$ -области ионосферы (Danilov, 2003; Laštovička, 2002; Liou et al., 2005; Maug, Volland, 1972; Klimenko et al., 2011; Prölss, Werner, 2002).

Однако проведённые нами в последние несколько лет исследования ионосферного отклика на сильные магнитные бури в марте и июне 2015 г. по данным восьми среднеширотных евразийских ионозондов (Черниговская и др., 2019; Шпынев и др., 2017; Chernigovskaya et al., 2021; Shrynev et al., 2018) выявили два совершенно новых эффекта ионосферно-магнитосферного взаимодействия. Во-первых, это существование долготных аномалий в вариациях компонент ГМП (вследствие пространственных неоднородностей различных масштабов в главном магнитном поле Земли, а также несовпадения магнитного и географического полюсов), которые, в свою очередь, проявляются в реакции среднеширотной ионосферы на магнитосферное возмущение. Во-вторых — существенное уменьшение электронной концентрации на фазе восстановления магнитной бури через 2–4 дня после главной фазы бури. Нами была выдвинута гипотеза, что низкие значения ионизации на фазе восстановления бури в соседних по долготе областях ионосферы обусловлены распространением над евразийским континентом атмосферной волны нейтрального газа с низким содержанием  $[O]/[N_2]$  в западном направлении. Эта волна формируется в нижней термосфере полярных широт в ночном секторе во время протекания сильной западной электроструи на главной фазе магнитной бури. За счёт высокой частоты столкновений молекулярных ионов и нейтралов такая волна приобретает большой масштаб и импульс и перемещается на большие расстояния даже при «выключении» ионосферного источника в авроральных широтах. Этот эффект подтвердился также данными анализа полного электронного содержания по измерениям на среднеширотной цепи из 15 приёмников GPS/GLONASS (GPS — *англ.* Global Positioning System — система глобального позиционирования; GLONASS — Глобальная навигационная спутниковая система) (Chernigovskaya et al., 2021).

### Данные экспериментальных измерений

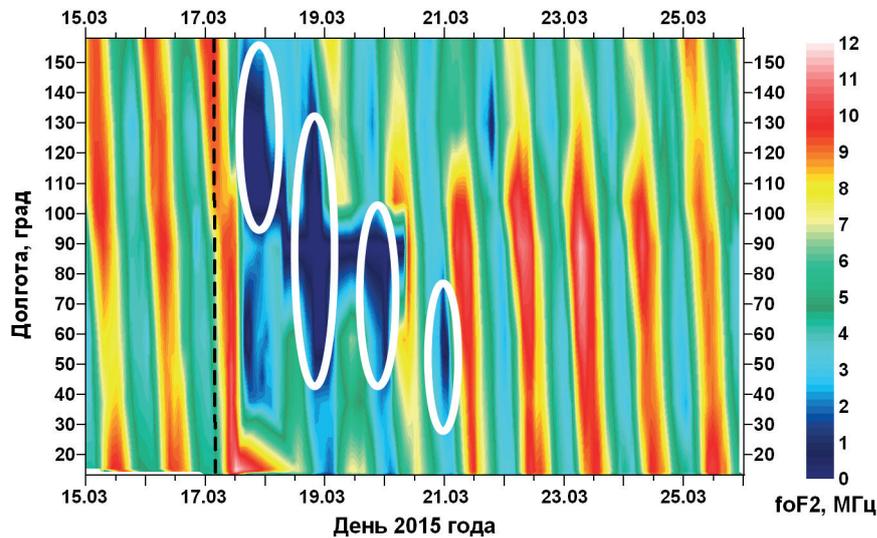
В настоящей работе для анализа отклика ионосферы на геомагнитную бурю используют: 1) данные о среднечасовых значениях критической частоты  $f_oF_2$  ионосферы по измерениям цепи из восьми среднеширотных евразийских ионозондов; 2) данные о значениях  $H$ -компоненты напряжённости ГМП с одноминутным разрешением по измерениям на среднеширотной цепи магнитометров глобальной сети INTERMAGNET (<http://www.intermagnet.org>); 3) спутниковые измерения отношения плотности  $[O]/[N_2]$  в столбе атмосферного газа на высотах термосферы (ионосферы) выше  $\sim 100$  км, проводимые оптическим методом прибором GUVI (*англ.* Global Ultraviolet Imager) на спутнике TIMED (*англ.* Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energy and Dynamics) (<http://guvitimed.jhuapl.edu/guvi-gallery13on2>).

В работах (Черниговская и др., 2019; Шпынев и др., 2017; Chernigovskaya et al., 2021; Shrynev et al., 2018) приведено подробное описание расположения ионозондов, магнитометров, а также методики обработки рядов исходных экспериментальных данных.

### Анализ экспериментальных данных и обсуждение результатов

По данным измерений цепи среднеширотных евразийских ионозондов, расположенных в диапазоне широт  $50$ – $60^\circ$  с. ш. с интервалом  $15$ – $20^\circ$  по долготе в долготном секторе  $13$ – $158^\circ$  в. д., на *рис. 1* (см. с. 297) (Черниговская и др., 2019) приведено долготно-временное распределение критической частоты ( $f_oF_2$ )  $F_2$ -слоя ионосферы, которая пропорциональна пиковой электронной плотности  $F$ -области, в период экстремальной бури  $15$ – $25$  марта 2015 г. В максимуме бури ( $22:00$ – $23:00$  UT (*англ.* Universal Time, всемирное время), 17.03.2015)  $D_{st}$ -индекс

понижался до значения  $-223$  нТл. Овалами на рисунке показано распространение на запад области низкой электронной концентрации после главной фазы бури 17 марта 2015 г. Из *рис. 1* видно, что в долготном секторе  $\sim 80\text{--}160^\circ$  в.д. зона основного отрицательного возмущения ионосферы (понижение  $f_oF2$  на  $5\text{--}7$  МГц относительно фонового уровня  $15\text{--}16$  марта) наблюдалась в течение двух суток (17 и 18 марта). В отличие от этого на долготах Европы днём 18 марта  $f_oF2$  была лишь на  $2\text{--}3$  МГц ниже фонового уровня. Однако на поздней восстановительной фазе бури 19 марта, когда на долготах  $\sim 80\text{--}120^\circ$  в.д. значения  $f_oF2$  поднялись до невозмущённого уровня, в европейском секторе, наоборот, наблюдалось понижение  $f_oF2$ , которое продолжалось и в последующие дни 20–21 марта. Оценки, сделанные нами по данным ионозондов, показали, что область пониженной электронной концентрации смещалась в западном направлении со скоростью  $\sim 50\text{--}70$  м/с в течение трёх суток (Шпынев и др., 2017; Chernigovskaya et al., 2021; Shpynev et al., 2018). По аналогии с этим мы предположили, что область низких значений  $f_oF2$ , которая появилась 21 марта на долготах  $\sim 140\text{--}160^\circ$  в.д., связана с перемещением на эти долготы области отрицательного ионосферного возмущения, образовавшейся в американском секторе на главной фазе магнитной бури.

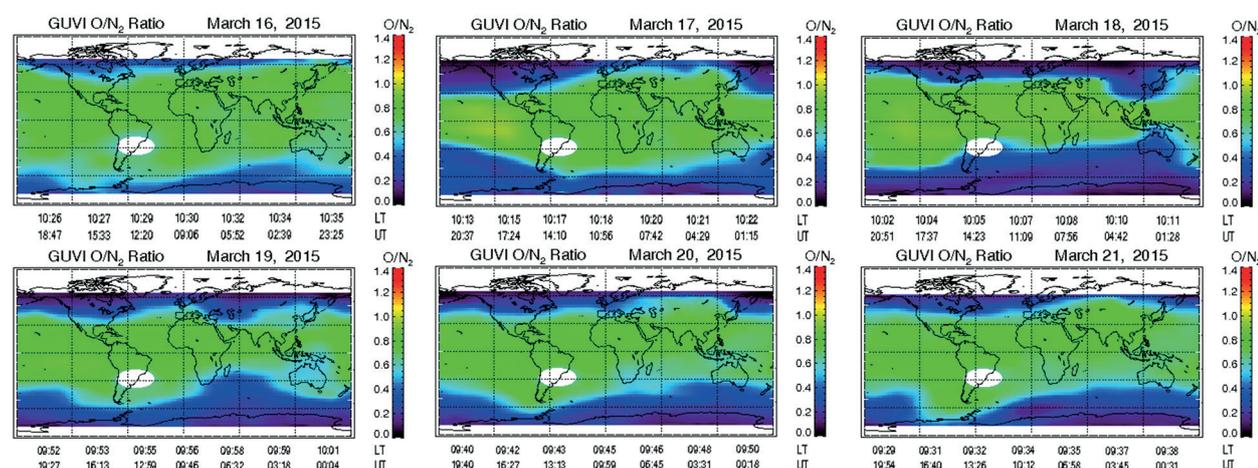


*Рис. 1.* Долготно-временные вариации  $f_oF2$  в период бури 15–25 марта 2015 г. (время UT). Вертикальная пунктирная линия показывает внезапное начало бури (SSC, *англ.* storm sudden commencement)

Такой продолжительный во времени и необычный эффект магнитной бури в ионосфере поставил естественный вопрос о физических причинах наблюдаемого явления. Для объяснения этого эффекта был рассмотрен хорошо известный механизм, связанный с тем, что ионосферный отклик на сильную магнитную бурю может быть связан с возмущениями состава атмосферного газа в нижней термосфере, вызванными нагревом газа авроральными электроструями и высыпаниями энергичных частиц в области высоких широт (Danilov, 2003; Klimenko et al., 2011; Laštovička, 2002; Liou et al., 2005; Prölss, Werner, 2002). Это в итоге приводит к уменьшению отношения  $[O]/[N_2]$  на высотах верхней атмосферы и, как следствие, к отрицательным возмущениям электронной концентрации в  $F$ -области ионосферы.

Для проверки выдвинутой гипотезы об образовании в термосфере глобальной волны атмосферного газа, которая двигалась на запад над евразийским континентом в течение более чем трёх суток после главной фазы бури, нами были проанализированы данные спутниковых измерений нейтрального состава с помощью ультрафиолетового спектрометра GUVI TIMED на высотах термосферы выше  $\sim 100$  км. На *рис. 2* (см. с. 298) представлены спутниковые данные отношения  $[O]/[N_2]$  (<http://guvitimed.jhuapl.edu/guvi-gallery13on2>) (Zhang et al., 2014), которые подтвердили образование обширной области пониженного отношения  $[O]/[N_2]$  над Дальним Востоком 17 марта 2015 г. В последующие дни эта область перемещалась на запад,

достигнув к 20 марта Западной Европы. Другая область пониженного отношения  $[O]/[N_2]$ , которая образовалась 17 марта над американским сектором, переместилась к 20–21 марта 2015 г. на долготы 140–160° в.д. и вновь была зарегистрирована над регионом Дальнего Востока. Эти вариации нейтрального состава термосферы привели к вариациям электронной концентрации ионосферы, зарегистрированной ионозондами в период магнитной бури (см. *рис. 1*).



*Рис. 2.* Глобальные пространственные распределения отношения  $[O]/[N_2]$  на высотах термосферы выше ~100 км по спутниковым измерениям GUVI TIMED для отдельных дней марта 2015 г.

В связи с особенностями орбиты спутника TIMED прибор GUVI проводит только одно измерение отношения плотности  $[O]/[N_2]$  в столбе термосферного газа в сутки для каждой географической координаты вдоль траектории пролёта. Поэтому при анализе данных ионозондов или приёмников GPS/GLONASS можно исследовать только медленные, межсуточные вариации, связанные с изменением химического состава ионосферы. Однако поскольку измерения ионизации по данным цепей ионозондов или приёмников GPS/GLONASS относятся к некоторому долготному интервалу, то этого вполне достаточно для проведения оценочных сравнений распределений термосферных и ионосферных параметров в некотором диапазоне долгот.

На *рис. 3* (см. с. 299) приведено долготно-временное распределение параметра  $[O]/[N_2]$  по данным GUVI TIMED, которое полностью подтверждает выдвинутую гипотезу, что область низкого отношения составов  $[O]/[N_2]$ , образовавшаяся в долготной области Дальнего Востока, смещается затем к западу в течение 2–4 сут (аналогично глобальным пространственным распределениям на *рис. 2*). Перемещаясь, область пониженного  $[O]/[N_2]$  вызывает уменьшение ионизации, тогда как в соседних долготных областях ионосферы ионизация к этому времени восстанавливается до значений в невозмущённых условиях.

Следует также отметить, что при восстановлении ионосферы после мартовской магнитной бури 2015 г. в Северном полушарии на средних широтах наблюдались величины ионизации (см. *рис. 1*), превышающие значения ионизации в спокойные дни (15–16 марта 2015 г.) перед началом магнитного возмущения (Klimenko et al., 2018; Ratovsky et al., 2018). Этот эффект «последствия» особенно убедительно проявился по данным ионозондов в Иркутске и Новосибирске начиная с 20 марта. Напомним, что эти ионозонды находятся в секторе долгот 80–110° в.д. (зона расположения Восточно-Сибирской континентальной магнитной аномалии), уровень вариаций ГМП в которой всегда более низкий по сравнению с соседними долготными регионами. В связи с этим над регионом Евразии на долготах ~80–110° ионосфера раньше всего восстанавливается после геомагнитных возмущений (Черниговская и др., 2019; Шпынев и др., 2017; Chernigovskaya et al., 2021; Shpynev et al., 2018). Позднее, с 22 марта 2015 г., эффект последствия наблюдался и по данным европейских ионозондов, а также по данным приёмников GPS/GLONASS.

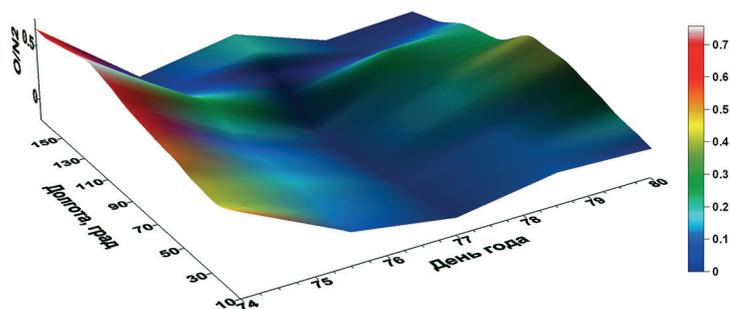


Рис. 3. Долготно-временное распределение  $[O]/[N_2]$  по измерениям GUVI TIMED для магнитной бури 17–25 марта 2015 г.

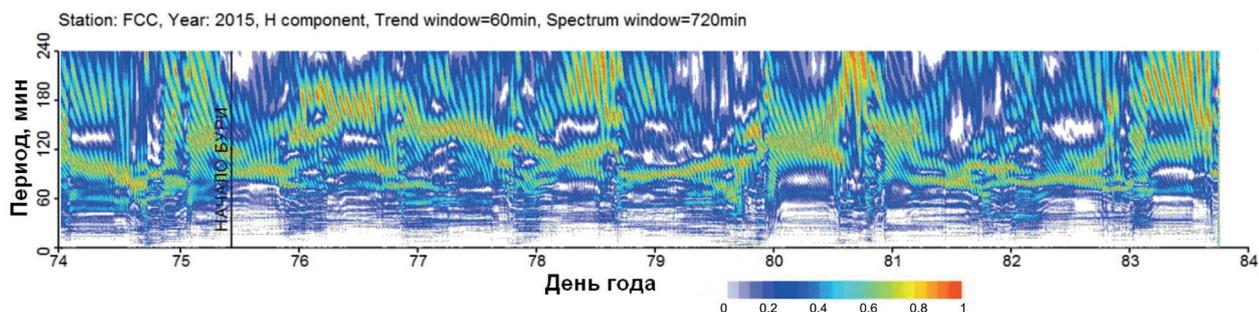
Таким образом, эффекты в  $F$ -области ионосферы на фазе восстановления магнитной бури в марте 2015 г. (сначала сильного понижения ионизации с последующей повышенной ионизацией) наблюдаются первоначально для ионозондов дальневосточного и восточно-сибирского регионов, позднее — для европейских ионозондов. Такая временная последовательность проявления эффектов ионизации косвенно также свидетельствует о перемещении волны ионизации над регионом Евразии в направлении с востока на запад. В работе (Ratovsky et al., 2018) подтверждение эффекта последствия магнитных бурь было получено из статистического анализа дневных ионосферных откликов на геомагнитные бури с использованием данных иркутского ( $52^\circ$  с. ш.,  $104^\circ$  в. д.) и калининградского ( $54^\circ$  с. ш.,  $20^\circ$  в. д.) ионозондов, а также численных расчётов с использованием модели ГСМ ТИП (глобальная самосогласованная модель системы «термосфера – ионосфера – протоносфера»). Авторы сравнивают возмущение  $[O]/[N_2]$ , равно как и возмущение электронной концентрации, с «колебаниям маятника», который переходит из отрицательной фазы в положительную в течение нескольких дней после начала фазы восстановления бури. Моделирование с помощью ГСМ ТИП показало, что основной причиной наблюдаемых положительных возмущений электронной концентрации оказывается увеличение концентрации атомарного кислорода за счёт его переноса от экваториальных широт к средним на поздней восстановительной фазе (Klimenko et al., 2018; Ratovsky et al., 2018). 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 счёт переноса кислорода от авроральных широт в сторону экватора.

Другой интересный эффект в вариациях состава  $[O]/[N_2]$  по данным GUVI TIMED в период геомагнитной бури может быть связан с низкочастотной составляющей вариаций компонент ГМП. В зарубежной литературе для обозначения этих колебаний часто используется термин ULF-wave (*англ.* ultra-low-frequency) (Троицкая, 1956). Хорошо известные геомагнитные пульсации представляют собой колебания геомагнитного поля и характеризуются квазипериодической структурой, занимая диапазон частот от тысячных долей герца до нескольких миллигерц. Многообразие видов магнитных пульсаций хорошо изучено. Отметим, что нас интересуют медленные нерегулярные пульсации, позволяющие формировать низкочастотные колебания заряженной компоненты атмосферного газа. Ввиду высокой частоты соударений ионов с нейтралами на высотах нижней атмосферы это импульсное воздействие в вариациях ГМП способно отражаться в вариациях нейтральной компоненты атмосферы.

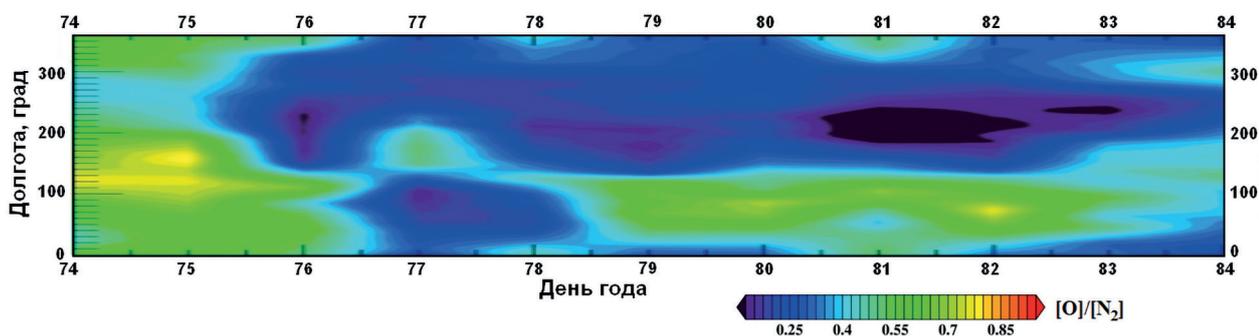
Динамические спектры подобных колебаний магнитного поля Земли характеризуются импульсной структурой с относительно широким спектром. По классификации (Jacobs et al., 1964), это могут быть геомагнитные пульсации с периодами  $P_{sb}$  и выше, связанные с возбуждением резонансных колебаний силовых линий ГМП, причём частота этих колебаний изменяется с широтой точки наблюдения. Генерация устойчивых типов пульсаций характеризует крупномасштабные изменения структуры магнитосферы.

Реально, на основе анализируемых в работе экспериментальных данных мы не можем с уверенностью утверждать, что вариации состава нейтральной атмосферы связаны

с геомагнитным источником. Мы лишь постараемся оценить возможную взаимосвязь этих явлений на основе имеющихся наблюдений. Для исследования нами был выбран достаточно продолжительный диапазон измерений скользящего спектра геомагнитных пульсаций в марте 2015 г. по данным среднеширотной цепи из 14 магнитометров глобальной сети INTERMAGNET. Пример скользящего спектра вариаций ГМП в период магнитной бури в марте 2015 г. представлен на *рис. 4*. По вертикальной оси отложены периоды колебаний, высокочастотная часть соответствует скользящему окну спектральной обработки, при которой спектры определялись из исходных одноминутных вариаций ГМП с усреднением 1 ч. Цветом показана спектральная плотность мощности сигнала — безразмерная величина, изменяющаяся от 0 до 1.



*Рис. 4.* Скользящий спектр вариаций  $H$ -компоненты геомагнитного поля в период магнитной бури в марте 2015 г., зафиксированный магнитометром обсерватории «Форт-Черчилль» (англ. Fort Churchill) ( $58,8^\circ$  с. ш.,  $94^\circ$  з. д.)



*Рис. 5.* Вариации  $[O]/[N_2]$  вдоль среднеширотного круга  $53,47^\circ$  с. ш.

Соответствующие этому диапазону межсуточные вариации по данным GUVI TIMED представлены на *рис. 5* во всём долготном диапазоне (Восточное и Западное полушария) вдоль широты  $53,47^\circ$  с. ш.

При сравнении временных вариаций на *рис. 4* и *5* можно отметить, что за несколько часов перед каждым эффектом уменьшения  $[O]/[N_2]$  (см. *рис. 5*) происходит возрастание амплитуды низкочастотной составляющей спектра вариаций ГМП (см. *рис. 4*). Влияют ли медленные вариации ГМП опосредованным образом на концентрацию атмосферных составляющих, остаётся вопросом открытым.

## Выводы

Исследование ионосферного отклика на экстремальную магнитную бурю в марте 2015 г. на основе анализа данных цепей ионозондов и магнитометров на средних широтах Северного полушария и спутниковых измерений GUVI TIMED отношения плотности  $[O]/[N_2]$  в столбе термосферного газа на высотах выше  $\sim 100$  км позволило сделать следующие выводы.

На фазе восстановления важную роль в динамике ионосферы средних широт могут играть возмущения в виде термосферных волн молекулярного газа, распространяющихся в западном направлении в течение нескольких суток.

В этой связи следует корректировать традиционный подход к временному интервалу анализа больших геомагнитных возмущений, когда анализ заканчивается при  $D_{st} \geq 0$ , так как возмущения состава нейтрального газа могут при этом продолжаться.

Отмечено возрастание амплитуды низкочастотной составляющей спектра вариаций  $H$ -компоненты ГМП за несколько часов перед событиями уменьшения  $[O]/[N_2]$  в столбе термосферного газа выше  $\sim 100$  км.

Эффект ULF-вариаций компонент ГМП (пульсаций периодов  $P_{cb}$  и медленнее), способных оказывать воздействие на нейтральную компоненту атмосферы в период геомагнитной бури, требует дальнейшего исследования с использованием экспериментальных данных о составе нейтрального термосферного газа, обладающих более высоким временным разрешением.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Экспериментальные данные получены частично с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» (Институт солнечно-земной физики СО РАН) (<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>).

## Литература

1. Троицкая В. А. Короткопериодные возмущения электромагнитного поля Земли // Вопросы изучения переменных электромагнитных полей. М.: Наука, 1956. С. 27–61.
2. Черниговская М. А., Шпынев Б. Г., Хабитуев Д. С., Ратовский К. Г., Белинская А. Ю., Степанов А. Е., Бычков В. В., Григорьева С. А., Панченко В. А., Коуба Д., Мелич Й. Долготные вариации ионосферных и геомагнитных параметров в Северном полушарии во время сильных магнитных бурь 2015 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 336–347. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-336-347.
3. Шпынев Б. Г., Золотухина Н. А., Полех Н. М., Черниговская М. А., Ратовский К. Г., Белинская А. Ю., Степанов А. Е., Бычков В. В., Григорьева С. А., Панченко В. А., Коренькова Н. А., Мелич Й. Исследование ионосферного отклика на сильную геомагнитную бурю в марте 2015 года по данным евразийской цепи ионозондов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 235–248. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-235-248.
4. Buonsanto M. J. Ionospheric storms — a review // Space Science Reviews. 1999. V. 88. P. 563–601.
5. Chernigovskaya M. A., Shpynev B. G., Yasyukevich A. S., Khabituiev D. S., Ratovsky K. G., Belinskaya A. Yu., Stepanov A. E., Bychkov V. V., Grigorieva S. A., Panchenko V. A., Kouba D., Melich J. Longitudinal variations of geomagnetic and ionospheric parameters in the Northern Hemisphere during magnetic storms according to multi-instrument observations // Advances in Space Research. 2021. V. 67. No. 2. P. 762–776. DOI: 10.1016/j.asr.2020.10.028.
6. Danilov A. D. Long-term trends of  $f_oF2$  independent on geomagnetic activity // Annales Geophysicae. 2003. V. 21. No. 5. P. 1167–1176.
7. Dudok de Wit T., Watermann J. Solar forcing of the terrestrial atmosphere // Comptes Rendus — Geoscience. 2009. V. 342. No. 4–5. P. 259–272. DOI: 10.1016/j.crte.2009.06.001.
8. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Moffett R. J., Quegan S. Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms // J. Geophysical Research. 1994. V. 99. P. 3893–3914.
9. Jacobs J. A., Kato Y., Matsushita S., Troitskaya V. A. Classification of geomagnetic micropulsations // J. Geophysical Research. 1964. V. 69. P. 180–181. DOI: 10.1029/JZ069i001p00180.
10. Klimenko M. V., Klimenko V. V., Ratovsky K. G., Goncharenko L. P., Fagundes R. R., de Jesus R., de Abreu A. J., Vesnin A. M. Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and lowlatitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005 // Radio Science. 2011. RS0D03. DOI: 10.1029/2010RS004590.
11. 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 – plasmasphere system and auroral electrojet at 30°E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015 // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2018. V. 180. P. 78–92. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.12.017.

12. *Laštovička J.* Monitoring and forecasting of ionospheric space weather effects of geomagnetic storms // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2002. V. 64. P. 697–705.
13. *Liou K., Newell P. T., Anderson B. J., Zanetti L., Meng C.-I.* Neutral composition effects on ionospheric storms at middle and low latitudes // *J. Geophysical Research*. 2005. V. 110. Art. No. A05309. DOI: 10.1029/2004JA010840.
14. *Mayr H. G., Volland H.* Magnetic storm effects in the neutral composition // *Planetary and Space Science*. 1972. V. 20. P. 379.
15. *Pröls G. W.* Ionospheric F-region storms // *Handbook of Atmospheric Electrodynamics* / ed. Volland H. Boca Raton: CRC Press, 1995. V. 2. Ch. 8. P. 195–248.
16. *Pröls G. W., Werner S.* Vibrationally excited nitrogen and oxygen and the origin of negative ionospheric storms // *J. Geophysical Research*. 2002. V. 107. No. A2. Art. No. 1016. DOI: 10.1029/2001JA900126.
17. *Ratovsky K. G., Klimenko M. V., Klimenko V. V., Chirik N. V., Korenkova N. A., Kotova D. S.* After-effects of geomagnetic storms: statistical analysis and theoretical explanation // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2018. V. 4. No. 4. P. 26–32. DOI: 10.12737/stp-44201804.
18. *Schunk R. W., Sojka J. J.* Ionosphere-thermosphere space weather issues // *J. Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1996. V. 58. P. 1527–1574. DOI: 10.1016/0021-9169(96)00029-3.
19. *Seaton M. J.* A possible explanation of the drop in F-region critical densities accompanying major ionospheric storms // *J. Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1956. V. 8. P. 122–124.
20. *Shpynev B. G., Zolotukhina N. A., Polekh N. M., Ratovsky K. G., Chernigovskaya M. A., Belinskaya A. Yu., Stepanov A. E., Bychkov V. V., Grigorieva S. A., Panchenko V. A., Korenkova N. A., Mielich J.* The ionosphere response to severe geomagnetic storm in March 2015 on the base of the data from Eurasian high-middle latitudes ionosonde chain // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2018. V. 180. P. 93–105. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.10.014.
21. *Zhang Y., Paxton L. J., Morrison D., Wolven B., Kil H., Meng C.-I., Mende S. B., Immel T. J.* O/N<sub>2</sub> changes during 1–4 October 2002 storms: IMAGE SI-13 and TIMED/GUVI observations // *J. Geophysical Research*. 2004. V. 109. Art. No. A10308. DOI: 10.1029/2004JA010441.

## Disturbances of thermospheric molecular gas and their relationship to longitudinal inhomogeneities of ionospheric disturbances in the Northern Hemisphere during geomagnetic storm

M. A. Chernigovskaya, B. G. Shpynev, A. S. Yasyukevich, D. S. Khabituev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk 664033, Russia  
E-mail: cher@iszf.irk.ru*

A study was carried out of the assumption that low ionization values at the recovery phase of a magnetic storm in the regions of the ionosphere adjacent in longitude may be caused by the propagation of an atmospheric wave of neutral gas with a low content of the [O]/[N<sub>2</sub>] ratio in the western direction. For the analysis, GUVI TIMED satellite measurements of the atmospheric components were used at heights of the thermosphere (ionosphere) above ~100 km. Due to the peculiarities of the TIMED satellite orbit, it is possible to study only slow day-to-day variations in the [O]/[N<sub>2</sub>] parameter associated with changes in the chemical composition at ionospheric heights. A spectral analysis of longitudinal variations of the geomagnetic field was also performed based on the data of the mid-latitude chain of INTERMAGNET magnetometers in the Northern Hemisphere during magnetic storms in March 2015. An increase in the amplitude of the low-frequency component of the spectrum of variations in the *H*-component of the geomagnetic field was noted for several hours before the events of a decrease in [O]/[N<sub>2</sub>] ratio in a column of thermospheric gas above ~100 km. A possible relationship between the spectra of variations in the geomagnetic field and longitudinal inhomogeneities of ionospheric disturbances during a geomagnetic storm has been discussed.

**Keywords:** chains of ionosondes and magnetometers, ionospheric disturbances, geomagnetic storm, variations in the gas composition of the thermosphere

Accepted: 31.08.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-295-304

## References

1. Troitskaya V.A., Short-period disturbances of the Earth's electromagnetic field, In: *Voprosy izucheniya peremennykh elektromagnitnykh polei* (Problems in the electromagnetic field study), Moscow: Nauka, 1956, pp. 27–61 (in Russian).
2. Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Khabituev D.S., Ratovsky K.G., Belinskaya A.Yu., Stepanov A.E., Bychkov V.V., Grigorieva S.A., Panchenko V.A., Kouba D., Mielich I., Longitudinal variations of geomagnetic and ionospheric parameters during severe magnetic storms in 2015, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 336–347 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-336-347.
3. Shpynev B.G., Zolotukhina N.A., Polekh N.M., Chernigovskaya M.A., Ratovsky K.G., Belinskaya A.Yu., Stepanov A.E., Bychkov V.V., Grigorieva S.A., Panchenko V.A., Korenkova N.A., Mielich J., Studying the ionosphere response to severe geomagnetic storm in March 2015 according to Eurasian ionosonde chain, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 235–248 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-235-248.
4. Buonsanto M.J., Ionospheric storms — a review, *Space Science Reviews*, 1999, Vol. 88, pp. 563–601.
5. Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Yasyukevich A.S., Khabituev D.S., Ratovsky K.G., Belinskaya A.Yu., Stepanov A.E., Bychkov V.V., Grigorieva S.A., Panchenko V.A., Kouba D., Mielich J., Longitudinal variations of geomagnetic and ionospheric parameters in the Northern Hemisphere during magnetic storms according to multi-instrument observations, *Advances in Space Research*, 2021, Vol. 67, No. 2, pp. 762–776, DOI: 10.1016/j.asr.2020.10.028.
6. Danilov A.D., Long-term trends of  $f_oF_2$  independent on geomagnetic activity, *Annales Geophysicae*, 2003, Vol. 21, No. 5, pp. 1167–1176.
7. Dudok de Wit T., Watermann J., Solar forcing of the terrestrial atmosphere, *Comptes Rendus — Geoscience*, 2009, Vol. 342, No. 4–5, pp. 259–272, DOI: 10.1016/j.crte.2009.06.001.
8. Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Moffett R.J., Quegan S., Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms, *J. Geophysical Research*, 1994, Vol. 99, pp. 3893–3914.
9. Jacobs J.A., Kato Y., Matsushita S., Troitskaya V.A., Classification of geomagnetic micropulsations, *J. Geophysical Research*, 1964, Vol. 69, pp. 180–181, DOI: 10.1029/JZ069i001p00180.
10. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Goncharenko L.P., Fagundes R.R., de Jesus R., de Abreu A.J., Vesnin A.M., Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and lowlatitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005, *Radio Science*, 2011, RS0D03, DOI: 10.1029/2010RS004590.
11. 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-plasmasphere system and auroral electrojet at 30°E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, Vol. 180, pp. 78–92, DOI: 10.1016/j.jastp.2017.12.017.
12. Laštovička J., Monitoring and forecasting of ionospheric space weather effects of geomagnetic storms, *Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, Vol. 64, pp. 697–705.
13. Liou K., Newell P.T., Anderson B.J., Zanetti L., Meng C.-I., Neutral composition effects on ionospheric storms at middle and low latitudes, *J. Geophysical Research*, 2005, Vol. 110, Art. No. A05309, DOI: 10.1029/2004JA010840.
14. Mayr H.G., Volland H., Magnetic storm effects in the neutral composition, *Planetary and Space Science*, 1972, Vol. 20, p. 379.
15. Prölss G.W., Ionospheric F-region storms, In: *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, Volland H. (ed.), Boca Raton: CRC Press, 1995, Vol. 2, Ch. 8, pp. 195–248.
16. Prölss G.W., Werner S., Vibrationally excited nitrogen and oxygen and the origin of negative ionospheric storms, *J. Geophysical Research*, 2002, Vol. 107, No. A2, Art. No. 1016, DOI: 10.1029/2001JA900126.
17. Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Chirik N.V., Korenkova N.A., Kotova D.S., After-effects of geomagnetic storms: statistical analysis and theoretical explanation, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, Vol. 4, No. 4, pp. 26–32, DOI: 10.12737/stp-44201804.
18. Schunk R.W., Sojka J.J., Ionosphere-thermosphere space weather issues, *J. Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1996, Vol. 58, pp. 1527–1574, DOI: 10.1016/0021-9169(96)00029-3.

19. Seaton M.J., A possible explanation of the drop in F-region critical densities accompanying major ionospheric storms, *J. Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1956, Vol. 8, pp. 122–124.
20. Shpynev B. G., Zolotukhina N.A., Polekh N. M., Ratovsky K. G., Chernigovskaya M. A., Belinskaya A. Yu., Stepanov A. E., Bychkov V. V., Grigorieva S. A., Panchenko V. A., Korenkova N. A., Mielich J., The ionosphere response to severe geomagnetic storm in March 2015 on the base of the data from Eurasian high-middle latitudes ionosonde chain, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, Vol. 180, pp. 93–105, DOI: 10.1016/j.jastp.2017.10.014.
21. Zhang Y., Paxton L.J., Morrison D., Wolven B., Kil H., Meng C.-I., Mende S. B., Immel T.J., O/N<sub>2</sub> changes during 1–4 October 2002 storms: IMAGE SI-13 and TIMED/GUVI observations, *J. Geophysical Research*, 2004, Vol. 109, Art. No. A10308, DOI: 10.1029/2004JA010441.