

Спектры вариаций геомагнитного поля и их связь с долготными неоднородностями ионосферных возмущений в северном полушарии во время геомагнитных бурь

Хабитуев Д.С., Шпынев Б.Г., Черниговская М.А., Ясюкевич А.С.
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

При исследовании влияния геомагнитных возмущений на ионосферу Земли традиционно определяющим фактором является воздействие наведенных внешних магнитосферных полей на ионизованную часть земной атмосферы, которая начинает играть важную роль в атмосферно-ионосферном взаимодействии, начиная с высот ~ 90 км.

Хорошо известно, что ионосферные эффекты магнитных бурь связаны с возмущениями в термосфере, вызываемыми усилением западного аврорального электроджета. Джоулев нагрев полярной атмосферы в области высот 100 км и выше генерирует сильные термосферные ветры и турбулентность, приводящие к переносу вверх молекулярного газа на высоты ионосферы. 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 (Prölss and Werner, *JGR*, 2002; Danilov, *Ann. Geophys.*, 2003; Liou et al., *JGR*, 2005; Laštovička, *JASTP*, 2009; Klimenko et al., *Radio Sci.*, 2011).

Однако проведенные несколько лет назад исследования ионосферного отклика на экстремальную геомагнитную бурю в марте 2015 г. по данным восьми среднеширотных евразийских ионозондов показали новый эффект ионосферно-магнитосферного взаимодействия, хорошо видимый на Рис. 1. как уменьшение электронной концентрации через 2-4 дня после главной фазы бури (Shrynev et al., *JASTP*, 2018; Черниговская и др., *СПДЗЗ*, 2018; Chernigovskaya et al., *JASR*, 2020). Нами была выдвинута гипотеза, что низкие значения ионизации на фазе восстановления бури в соседних по долготе областях ионосферы обусловлены распространением в юго-западном направлении атмосферной волны нейтрального газа с низким содержанием $[O]/[N_2]$.

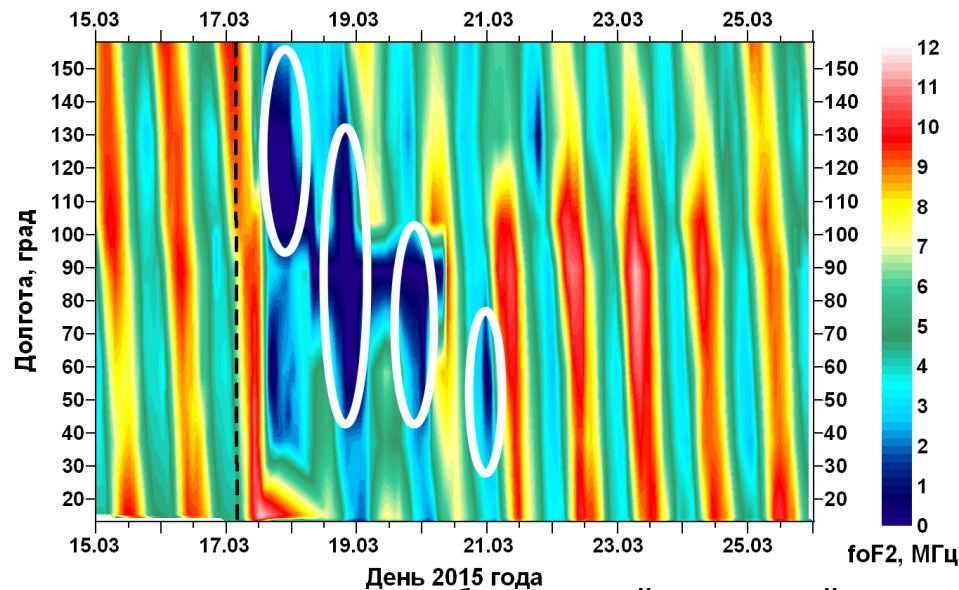


Рис. 1. Распространение области низкой электронной концентрации после главной фазы бури в марте 2015 г.

Этот эффект подтвердился также данными анализа полного электронного содержания (ПЭС) по измерениям на среднеширотной цепи из 15 приемников GPS/GLONASS.

Для проверки выдвинутой гипотезы были использованы спутниковые измерения атмосферных составляющих на высотах термосферы (ионосферы) выше ~ 100 км, проводимые прибором GUVI на спутнике TIMED (http://guvi.jhuapl.edu/site/data/data_fetch/I3_on2_gif). В связи с особенностями орбиты спутника TIMED, прибор GUVI производит только одно измерение параметра $[O]/[N_2]$ в сутки для каждой географической координаты вдоль орбиты пролета. Поэтому при анализе данных ионозондов или приемников GPS/GLONASS можно исследовать только медленные, межсуточные вариации, связанные с изменением химического состава нижней ионосферы. Однако, поскольку измерения ионизации по данным цепей ионозондов или приемников GPS/GLONASS относятся к некоторому долготному интервалу, то этого вполне достаточно для проведения оценочных сравнений распределений термосферных и ионосферных параметров в некотором диапазоне долгот.

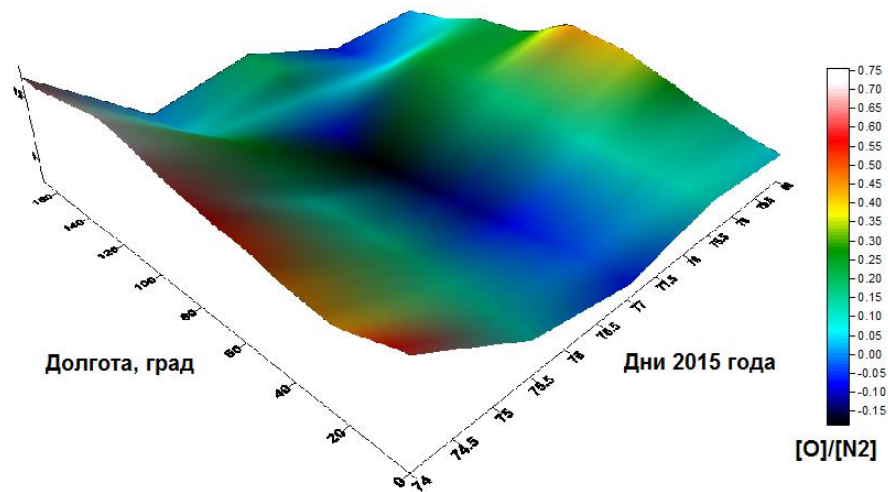


Рис. 2. Долготно-временное распределение $[O]/[N_2]$ GUVI TIMED для магнитной бури 17-24 марта 2015 г.

Долготно-временное распределение $[O]/[N_2]$ по данным GUVI TIMED полностью подтверждает выдвинутую гипотезу о том, что область низкого содержания $[O]/[N_2]$, образовавшаяся в какой-либо долготной области, смещается к юго-западу через 2-4 суток (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 невозмущенных условиях.

Другой неожиданный эффект в вариациях состава $[O]/[N_2]$ по данным GUVI TIMED в период геомагнитной бури связан с низкочастотной частью вариаций компонент геомагнитного поля (ГМП).

В зарубежной литературе для обозначения этих колебаний часто используется термин ULF-wave (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.

Многообразии видов магнитных пульсаций хорошо изучено. Отметим, что нас интересуют медленные нерегулярные пульсации периодов Pc6 и медленнее, позволяющие формировать низкочастотные колебания, отражающиеся на нейтральной компоненте атмосферы. Динамические спектры этих колебаний характеризуются импульсной структурой с относительно широким спектром. По классификации [Jacobs et al., 1964] это могут быть геомагнитные пульсации с периодами Pc6 и выше, связанные с возбуждением резонансных колебаний силовых линий геомагнитного поля, причем частота этих колебаний изменяется с широтой точки наблюдения. Генерация устойчивых типов пульсаций характеризует крупномасштабные изменения структуры магнитосферы.

Реально, мы не можем с уверенностью утверждать, что вариации состава нейтральной атмосферы вызваны геомагнитным источником. Мы лишь постараемся оценить 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 (<http://www.intermagnet.org>). Пример спектра вариаций ГМП в период магнитной бури в марте 2015 г. представлен на Рис. 3. По вертикальной оси отложены периоды колебаний, высокочастотная часть соответствует скользящему окну спектральной обработки, при которой спектры определялись из исходных 1-минутных вариаций ГМП с усреднением 1 час. Соответствующие этому диапазону среднесуточные вариации по данным GUVI TIMED представлены на Рис. 4 во всем долготном диапазоне на широте 53.47° с.ш.

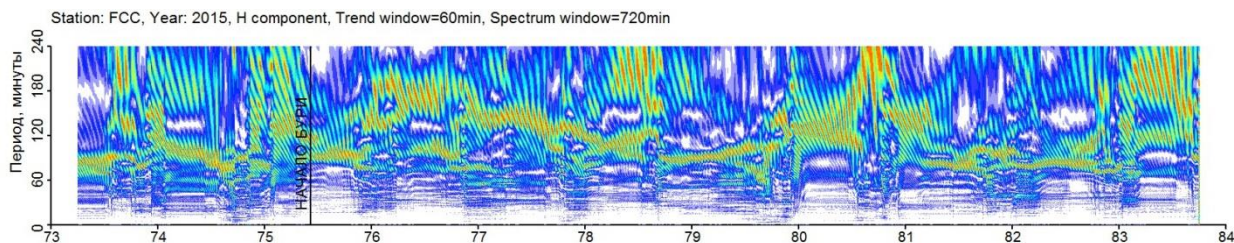


Рис. 3. Скользящий спектр вариаций H-компоненты геомагнитного поля в период магнитной бури в марте 2015 г. магнитометром Форт Черчилль (58.8° с.ш., 94° з.д.).

При сравнении временных вариаций на Рис. 3 и 4 выявлено, что за несколько часов перед каждым эффектом уменьшения $[O]/[N_2]$ происходит возрастание амплитуды низкочастотной составляющей спектра вариаций ГМП. Влияют ли медленные вариации ГМП опосредованным образом на концентрацию атмосферных составляющих, остается вопросом открытым.

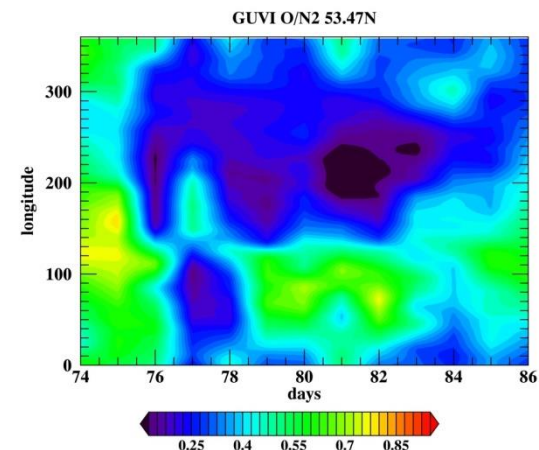


Рис. 4. Вариации $[O]/[N_2]$ вдоль широтного круга 53.47° с.ш.