

DOI: 10.37614/2588-0039.2020.43.024

УНЧ ВОЗМУЩЕНИЯ, ВЫЗВАННЫЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ ОБОЛОЧКОЙ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МАГНИТНЫХ ОБЛАКОВ

О.М. Бархатова¹, В.Г. Воробьев², С.Е. Ревунов³, Д.С. Долгова³, Н.В. Косолапова³

¹ФГБОУ ВО Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород, Россия

²ФГБНУ "Полярный геофизический институт", Апатиты, Россия

³ФГБОУ ВО Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина,
Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В периоды магнитосферных суббурь зарегистрированы одновременные возмущения полного электронного содержания и горизонтальной компоненты геомагнитного поля в диапазоне периодов Pсб, возникающие в интервалы взаимодействия магнитосферы Земли с турбулентной оболочкой магнитных облаков. Вейвлет анализ возмущений межпланетного магнитного поля, скорости и плотности плазмы солнечного ветра свидетельствует о существовании в межпланетной среде колебаний с такими же периодами.

Введение. Магнитные облака (МО) солнечного ветра являются одной из основных причин возникновения геомагнитной возмущенности, которая выражается в развитии магнитных бурь и магнитосферных суббурь [1, 2]. Возникновение и развитие суббуревой активности в магнитосфере напрямую связано с динамикой параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля [3]. В периоды суббурь возникает интенсивная трехмерная токовая система (токовый клин суббури) [4], которая связывает активные области магнитосферы с высокоширотной ионосферой. Благодаря формированию такой токовой системы, низкочастотная МГД возмущенность солнечного ветра может непосредственно передаваться в магнитосферно-ионосферную систему [5] и регистрироваться наземными обсерваториями.

Настоящее исследование посвящено поиску одновременной ионосферной и геомагнитной МГД возмущенности в диапазоне периодов Pсб в ночное и дневное местное время в периоды интенсивной суббуревой активности. Предполагается, что низкочастотные ночные МГД возмущения, содержащиеся в переходных областях магнитных облаков (МО), могут передаваться из солнечного ветра в геомагнитное поле и ионосферу. Такой подход является основным отличием от известных моделей возникновения УНЧ колебаний, в которых магнитосфера глобально резонирует под действием потоков солнечного ветра [6].

Используемые данные и методы исследования. Анализ МГД возмущений, генерируемых турбулентными явлениями оболочек МО в диапазоне периодов Pсб (7–35 минут), выполнен для семи событий, представленных в Таблице 1. Каждое из рассматриваемых МО вызывало развитие последовательностей магнитосферных суббурь интенсивностью в AL индексе от -500 нТл до -1800 нТл.

Таблица 1.

Событие	Регистрация УВ	Интервал UT	Спокойная часть, UT	Возмущенная часть, UT
10.08.2000	05:22 UT	04:22 – 07:22	04:22 – 05:22	05:22 – 07:22
06.11.2000	09:50 UT	08:50 – 11:50	08:50 – 09:50	09:50 – 11:50
18.02.1999	02:55 UT	01:55 – 04:55	01:55 – 02:55	02:55 – 04:55
20.03.2003	04:50 UT	03:50 – 06:50	03:50 – 04:50	04:50 – 06:50
14.06.2005	18:35 UT	17:35 – 20:35	17:35 – 18:35	18:35 – 20:35
05.04.2010	08:30 UT	07:30 – 10:30	07:30 – 08:30	08:30 – 10:30
03.08.2010	18:05 UT	17:00 – 20:00	17:00 – 18:05	18:05 – 20:00

Для обнаружения ионосферных и геомагнитных возмущений были использованы данные GPS станций о полном электронном содержании (ПЭС) и значения Н-компоненты геомагнитного поля на магнитных обсерваториях, расположенных в интервале широт $30-60^\circ$ N. В различные периоды станции находились как в ночном секторе LT, т.е. в долготном секторе западного электроджета, так и в дневном секторе.

Волновые явления в ионосфере изучались в течение часового интервала перед регистрацией ударной волны (УВ) каждого МО на космическом аппарате (спокойная часть, Таблица 1) и двухчасового интервала после (возмущенная часть, Таблица 1). Характерные времена появления внемагнитосферных и ионосферных МГД возмущений и их периоды устанавливались на основе использования метода спектрального вейвлет анализа с базовой функцией Добеши 4 порядка.

Ионосферная МГД возмущенность. Результаты спектрального анализа низкочастотных МГД возмущений, полученные по данным о вариациях ПЭС ионосферы и горизонтальной компоненты геомагнитного поля в «спокойные» и «возмущенные» интервалы времени для события 06 ноября 2000 г. представлены на рис. 1.

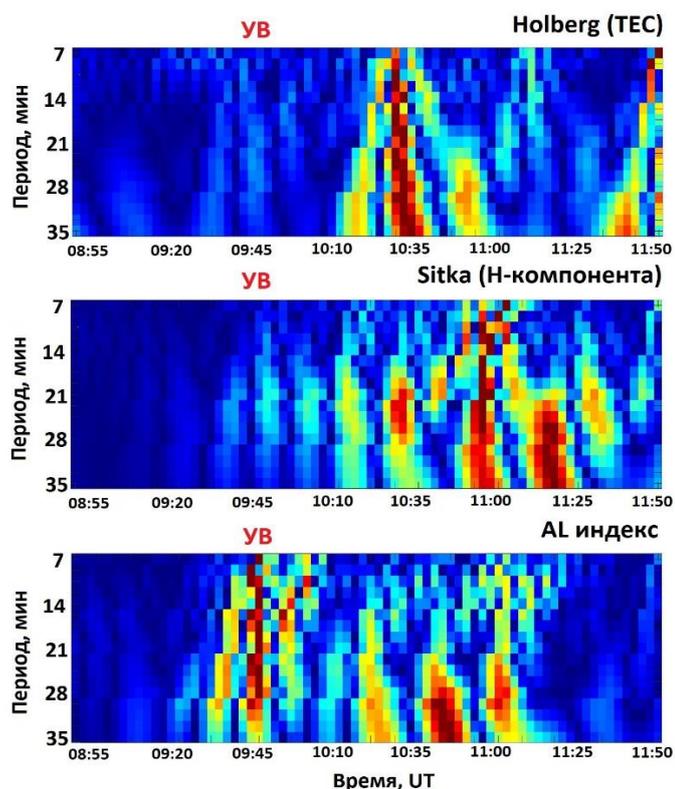


Рисунок 1. Вейвлет-спектры ПЭС по данным станции Holberg (50.65° с.ш., 231.98° в.д.), Н-компоненты геомагнитного поля по данным станции Sitka (57.06° с.ш., 224.67° в.д.) и индекса AL для события 06 ноября 2000 г; УВ - область регистрации ударной волны магнитного облака.

Особенности реакции магнитосферно-ионосферной системы на УВ и турбулентную оболочку МО в этом событии исследовались в местное ночное время на основе данных двух ионосферных GPS станций: Holberg (50.65° с.ш., 231.98° в.д., $L = 2.87$) и Mammoth Lakes (37.65° с.ш., 241.04° в.д., $L = 1.84$) и трех магнитных станций Sitka (57.1° с.ш., 224.67° в.д., $L = 3.8$), Victoria (48.52° с.ш., 236.58° в.д., $L = 2.7$), Tucson (32.17° с.ш., 249.27° в.д., $L = 1.66$). Используемые GPS и магнитные станции расположены в интервале широт от 32° до 57° N. На рис. 1 приведены вейвлет-спектры вариаций ПЭС на станции Holberg, Н-компоненты геомагнитного поля на станции Sitka и индекса AL в интервале от 08:50 UT до 11:50 UT. Анализ полученных вейвлет-картин показывает, что одновременные спектральные максимумы вариаций ПЭС и Н-компоненты отмечаются в интервале времени 10:10 - 11:00 UT. Характерные периоды возмущений лежат в диапазоне P_{сб}. Отметим, что в интегральном индексе AL, характеризующем активность западного электроджета, возмущения от ударной волны магнитного облака и его переходной области прослеживаются даже более отчетливо, чем на отдельных магнитных станциях. Как видно из рис. 1, возмущения AL сопровождаются интенсивными ионосферными возмущениями. На более низкоширотных станциях общий

уровень ионосферной и геомагнитной возмущенности ниже. Это может свидетельствовать о том, что МГД возмущения распространяются от аврорального источника к средним широтам с затуханием. Следует заметить, что в интервал, отвечающий спокойному солнечному ветру до прихода УВ, ионосферные и геомагнитные возмущения одновременно не наблюдаются, а общий уровень возмущенности значительно ниже, чем в интервал времени после прихода УВ.

Можно заключить, что в период взаимодействия магнитосферы с турбулентной оболочкой облаков в авроральной зоне наблюдается усиление суббуревой активности. В эти же интервалы на наземных ионосферных и магнитных станциях отмечается одновременная УНЧ возмущенность в изучаемом частотном диапазоне.

Выполненная на основе анализа вейвлет-спектров оценка уровня возмущенности в системе магнитосфера-ионосфера и обнаружение МГД возмущений в периоды прохождения Земли через оболочку МО для оставшихся шести случаев демонстрирует результаты, сходные с рассмотренными выше на рис. 1: до прихода ударных волн одновременная ионосферная и геомагнитная возмущенность отсутствует, но регистрируется при взаимодействии магнитосферы с оболочкой МО.

Отмеченная выше ночная возмущенность ионосферно-магнитосферной системы может быть связана с проникновением в магнитосферу МГД возмущений солнечного ветра через трехмерную токовую систему клина суббури. С другой стороны, подобные возмущения часто связывают с резонансным откликом магнитосферы на прибытие ударной волны магнитного облака [5]. С целью проверки действия такого механизма в рассматриваемых случаях, выполнено сопоставление возмущений ПЭС и Н-компоненты геомагнитного поля на станциях, находящихся с дневной стороны магнитосферы. Сопоставление полученных вейвлет-картин показывает не только отсутствие одновременности в рассматриваемых геомагнитной и ПЭС возмущенности, но и практически полное отсутствие возмущений ПЭС на всём рассматриваемом интервале. В Н-компоненте геомагнитного поля некоторая незначительная возмущённость наблюдается. Однако, ввиду её рассогласованности по времени с возмущениями в плазме солнечного ветра и ММП, эта возмущенность не связана с подошедшим магнитным облаком.

Продемонстрированная выше на примере одного события методика была применена для семи магнитных облаков (табл. 1). Поиск синхронизованных ионосферных и геомагнитных возмущений был выполнен в ночное и дневное местное время с целью проверки степени глобального воздействия УНЧ возмущений оболочек МО на магнитосферно-ионосферную систему.

На рисунке 2а представлена гистограмма общего количества событий, для которых при прохождении магнитосферы через оболочку МО в ночное местное время регистрируется синхронизованная ионосферная и геомагнитная возмущенность. По оси абсцисс отложены средние значения периодов на интервалах длительностью 3.5 мин, на которые был разделен весь исследуемый диапазон, по оси ординат – общее количество событий. Гистограмма демонстрирует увеличение числа событий с одновременно регистрируемой возмущенностью ионосферных и геомагнитных возмущений для интервалов периодов 7-10.5, 17.5-21 и 28-31.5 мин.

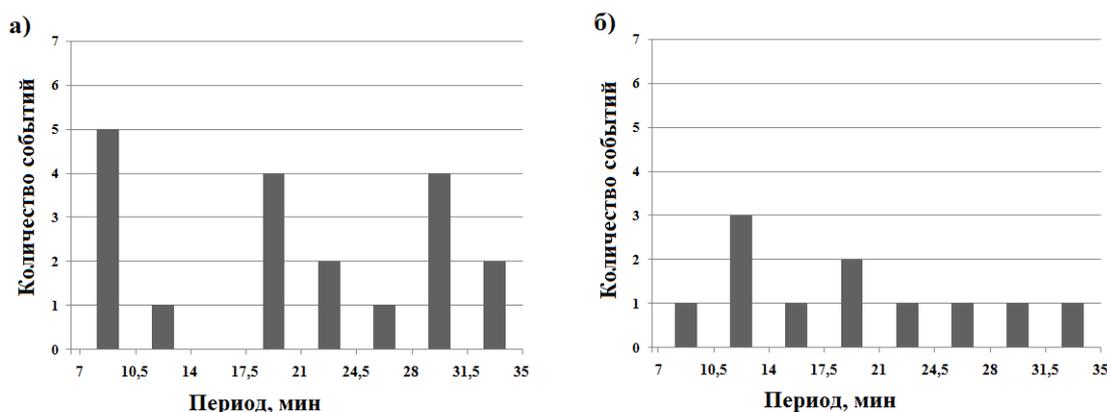


Рисунок 2. Гистограммы количества событий, для которых возникает синхронизованная ионосферная и геомагнитная возмущенность в ночное местное время (а) и в местное дневное время (б). По оси абсцисс отложены интервалы периодов возмущений.

Анализ вейвлет-спектров ПЭС и Н-компоненты геомагнитного поля на дневной стороне магнитосферы, выполненный в тех же интервалах времени для всех рассматриваемых событий показал, что синхронизованная ионосферная и геомагнитная возмущенность практически отсутствует (рис. 2б). Наибольшее число одновременных ионосферных и геомагнитных возмущений в дневное время

регистрируется на интервале периодов 10.5-14 минут. Этот интервал не совпадает с наиболее часто регистрируемыми «ночными» периодами, выделенными ранее. Это может означать, что регистрируемые в дневное и ночное местное время одновременные возмущения ПЭС и геомагнитного поля имеют разные источники.

Заключение. Проведен анализ УНЧ ионосферных и геомагнитных возмущений в диапазоне периодов Pсб, возникающих в интервалы суббулевой активности, вызываемой турбулентными оболочками магнитных облаков солнечного ветра.

Для всех событий в местное ночное время на широтах 30° - 60° с.ш. обнаружена синхронизованная по частоте одновременная ионосферная и геомагнитная возмущенность. Наиболее часто одновременность ионосферных и геомагнитных ночных возмущений была отмечена для интервалов периодов 7-10.5, 17.5-21 и 28-31.5 мин. В магнитноспокойный часовой интервал перед приходом к магнитосфере ударной волны, одновременные ионосферные и геомагнитные возмущения на рассматриваемых станциях отсутствуют. В местное дневное время синхронизованная ионосферная и геомагнитная возмущенность практически отсутствует. В редких случаях ее возникновения период вариаций не совпадает с наиболее часто регистрируемыми «ночными» периодами. Это означает, что регистрируемые в дневное и ночное местное время возмущения имеют разные источники.

Можно заключить, что низкочастотная МГД возмущенность возникает в магнитосферно-ионосферной системе только в случае развития суббулевой активности и только в местное ночное время. Согласно рассматриваемому нами качественному сценарию, под воздействием возмущенного замагниченного солнечного ветра геомагнитный хвост магнитосферы может передать рассматриваемые УНЧ колебания западному авроральному электроджету (AL), который является частью трехмерной токовой системы клина суббури. Этот активный электроджет может, в свою очередь, являться источником среднеширотных МГД возмущений, регистрируемых на среднеширотных магнитных обсерваториях и в данных GPS. Полученные результаты согласуются с выводами работ [5, 7-9].

Список литературы

1. *Дэспирак И.В., Любич А.А., Клейменова Н.Г.* “Полярные” и “высокоширотные” суббури и условия в солнечном ветре // Геомагнетизм и Аэронаука. 2014. Т. 54, № 5. С. 619–626. DOI: 10.7868/S0016794014050046
Despirak I.V., Lyubchich A.A., Kleimenova N.G. Polar and high latitude substorms and Solar wind conditions // Geomagnetism and Aeronomy. 2014. V. 54. № 5. P. 575-582.
2. *Barkhatov N.A., Revunov S.E., Mukhina M.V. et al.* Establishing the orientation of shock wave plane of solar wind magnetic cloud for conclusions about the level of auroral substorm activity // JP Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. V. 17. No. 1. P. 195 - 202. DOI: 10.17654/HM017010195
3. *Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Zverev V.L., Antonova E.E.* Influence of Solar wind plasma parameters on the intensity of isolated magnetospheric substorms // Geomagnetism and Aeronomy. 2018. V. 58. № 3. P. 295-306.
4. *McPherron R.L., Barfield J.N.* A seasonal change in the effect of field-aligned currents at synchronous orbit // J. Geophys. Res. 1980. V. 85. N. A12. P. 6743–6746. DOI: 10.1029/JA085iA12p06743
5. *Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Самсонов С.Н.* Иррегулярные Pi3 пульсации и их связь с потоками заряженных частиц в магнитосфере и ионосфере // “Physics of Auroral Phenomena”, Proc. XXXVIII Annual Seminar. 2015. Apatity. P. 71-74.
6. *Kepko L., Spence H.E.* Observations of discrete, global magnetospheric oscillations directly driven by solar wind density variations // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. P.1257. DOI: 10.1029/2002JA009676
7. *Klibanova Yu.Yu., Mishin V.V., Tsegmed B.* Specific Features of Daytime Long-Period Pulsations Observed during the Solar Wind Impulse against a Background of the Substorm of August 1, 1998 // Cosmic Research. 2014. V. 52. No. 6. P. 421–429.
8. *Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Shott J.-J.* Wave geomagnetic response of the magnetosphere to an interplanetary magnetic cloud that approached the Earth on July 14-15,2000 (a Bastille Day Event) // Geomagnetism and Aeronomy. 2003. V. 43. № 3. P. 299-308.
9. *Бархатов Н.А., Виноградов А.Б., Ревунова Е.А.* Проявление ориентации магнитных облаков солнечного ветра в сезонной вариации геомагнитной активности // Космические исследования. 2014. Т. 52, № 4. С. 286-295. DOI: 10.7868/80023420614040025