ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 3, с. 331–335

УДК 550.388.2

УНЧ ВОЗМУЩЕНИЯ, ВЫЗВАННЫЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ ОБОЛОЧКОЙ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МАГНИТНЫХ ОБЛАКОВ

© 2021 г. О. М. Бархатова[1, *], В. Г. Воробьев[2], Н. А. Бархатов[3], С. Е. Ревунов[3]

[1]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия*

[2]*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия*

[3]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Нижегородский государственный педагогический университет имени К. Минина, Нижний Новгород, Россия*

**E-mail: o.barkhatova@inbox.ru*

Поступила в редакцию 25.09.2020 г.
После доработки 20.10.2020 г.
Принята к публикации 27.11.2020 г.

В периоды магнитосферных суббурь зарегистрированы одновременные возмущения полного электронного содержания и горизонтальной компоненты геомагнитного поля в диапазоне периодов Pc6, 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.

DOI: 10.31857/S0367676521030066

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 Pc6 в ночное и дневное местное время в периоды интенсивной суббуревой активности. Предполагается, что низкочастотные МГД возмущения, содержащиеся в переходных областях магнитных облаков (МО), могут проникать в ночное местное время из солнечного ветра в магнитосферу и ионосферу через токовый клин суббури. 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 Pc6 (7–35 мин), выполнен для семи событий, представленных в табл. 1. Каждое из рассматриваемых МО вызывало развитие последовательностей магнитосферных суббурь интенсивностью в AL индексе от –500 до –1800 нТл.

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

Возмущенность межпланетной среды определялась по данным о плотности и скорости солнечного ветра и вариациям модуля межпланетного магнитного поля (ММП). Волновые явления в

Таблица 1. Параметры событий

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

ионосфере изучались в течение часового интервала перед регистрацией ударной волны (УВ) каждого МО на космическом аппарате (спокойная часть, табл. 1) и двухчасового интервала после (возмущенная часть, табл. 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.

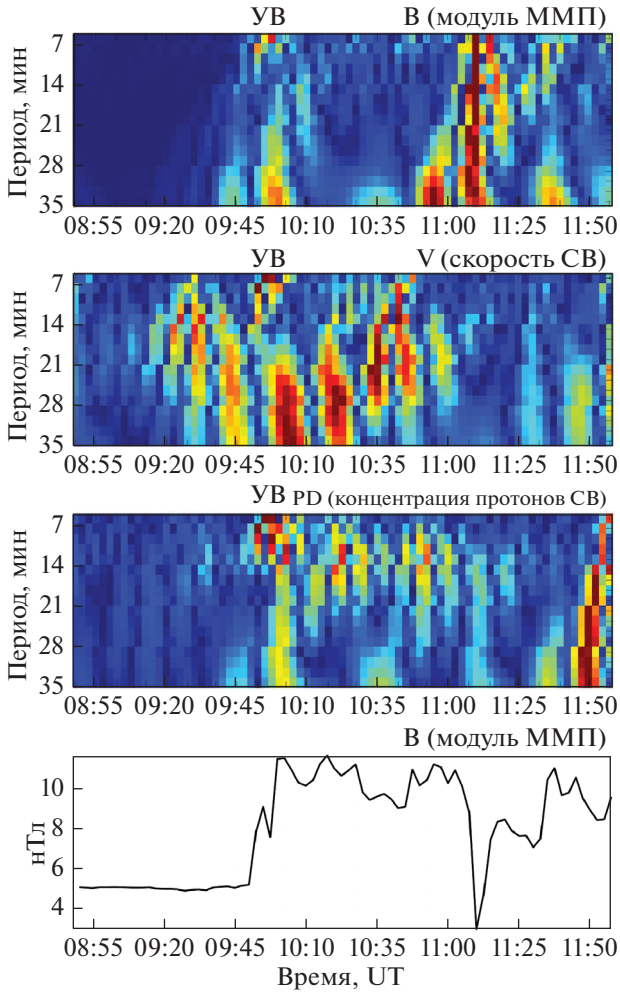

Рис. 1. Вейвлет-спектры модуля ММП (*а*), плотности (*б*) и скорости (*в*) солнечного ветра для события 06 ноября 2000 г.; ударная волна в 09:50 UT. По вертикальной оси – период (в мин), по горизонтальной оси – время UT.

ВНЕМАГНИТОСФЕРНАЯ МГД ВОЗМУЩЕННОСТЬ

Процессы воздействия УНЧ возмущений солнечного ветра на магнитосферно-ионосферную систему в интервалы суббуревой активности рассмотрим подробно на примере магнитного облака, зарегистрированного 06 ноября 2000 г. и вызвавшего серию суббурь с интенсивностью в AL до –1800 нТл. Анализировался трехчасовой интервал, содержащий спокойную часть (1 ч до УВ) и возмущенную часть (2 ч после УВ). Для этого события на рис. 1 приведены вейвлет спектры модуля ММП (*а*), плотности (*б*) и скорости (*в*) солнечного ветра. Представленные рисунки демонстрируют наличие синхронных интенсивных возмущений в ММП и параметрах солнечного ветра на возмущенном интервале, т.е. при взаимодействии магнитосферы Земли с турбулентной оболочкой МО. В параметрах солнечного ветра максимумы вейвлет-спектров отмечаются сразу же за ударной волной (10:00–11:00 UT). В часовом интервале перед УВ возмущенность в этих параметрах отсутствовала и геомагнитные возмущения не регистрировались.

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. 2.

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° с.ш. На рис. 2 приведены вейвлет-спектры вариаций ПЭС на станции Holberg, H-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 H-компоненты отмечаются в интервале времени 10:10–11:00 UT. Характерные периоды возмущений лежат в диапазоне Pc6. 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. 2, 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 авроpального 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.

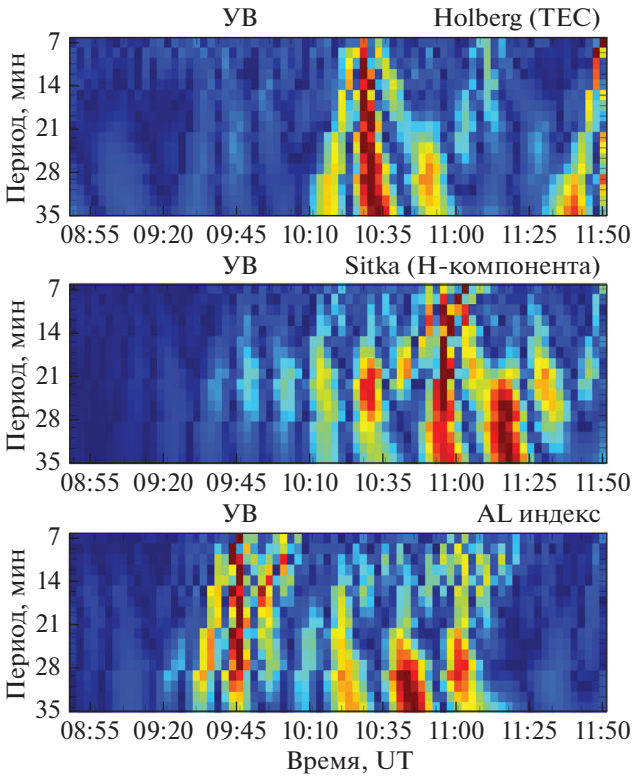

Рис. 2. Вейвлет-спектры ПЭС по данным станции Holberg (50.65° с.ш., 231.98° в.д.), H-компоненты геомагнитного поля по данным станции Sitka (57.06° с.ш., 224.67° в.д.) и индекса AL для события 06 ноября 2000 г.; УВ – область регистрации ударной волны магнитного облака.

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 и 2: 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 [6]. С целью проверки действия такого механизма в рассматриваемых случаях, выполнено сопоставление возмущений ПЭС и H-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 всем рассматриваемом интервале. В H-компоненте геомагнитного поля некоторая незначительная возмущенность наблюдается. Однако, ввиду ее 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.

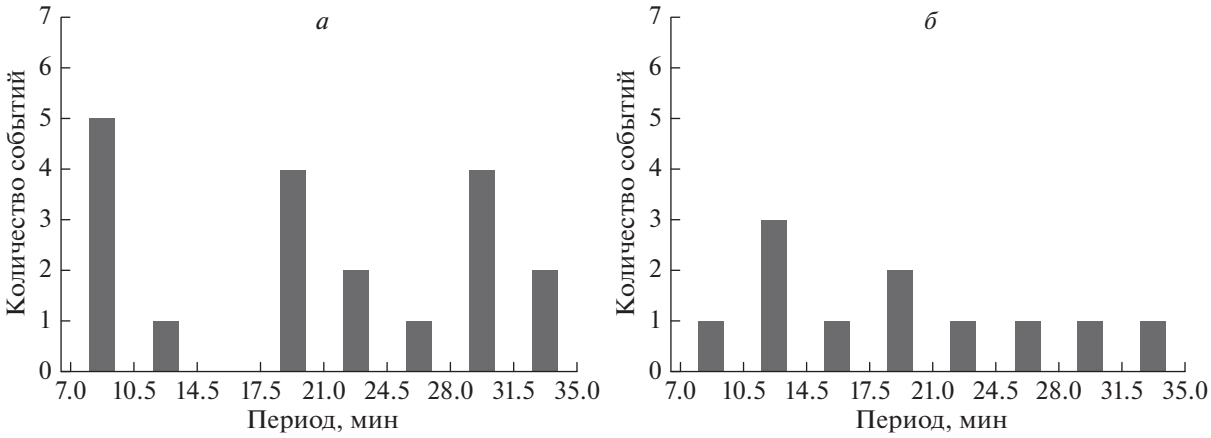

Рис. 3. Гистограммы количества событий, для которых возникает синхронизованная ионосферная и геомагнитная возмущенность в ночное местное время (*а*) и в местное дневное время (*б*). По оси абсцисс отложены интервалы периодов возмущений.

На рис. 3*а* 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.

Анализ вейвлет-спектров ПЭС и H-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. 3*б*). 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 Pc6, возникающих в интервалы суббуревой 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 суббуревой 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., Любчич А.А., Клейменова Н.Г.* // Геомагн. и аэроном. 2014. Т. 54. № 5. С. 619; *Despirak I.V., Lyubchich A.A., Kleimenova N.G.* // Geomagn. Aeron. 2014. V. 54. No. 5. P. 575.
2. *Barkhatov N.A., Revunov S.E., Mukhina M.V. et al.* // JP J. Heat Mass Transfer. 2019. V. 17. No. 1. P. 195.
3. *Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е., Зверев В.Л.* // Геомагн. и аэроном. 2018. Т. 58. № 3. С. 1; *Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Zverev V.L., Antonova E.E.* // Geomagn. Aeron. 2018. V. 58. No. 3. P. 295.
4. *McPherron R.L. Barfield J.N.* // J. Geophys. Res. 1980. V. 85. No. A12. Art. No. 6743.
5. *Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Самсонов С.Н.* // Physics of Auroral Phenom. Proc. XXXVIII Ann. Seminar. (Apatity, 2015). P. 71.
6. *Kepko L., Spence H.E.* // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. P. 1257.
7. *Клибанова Ю.Ю., Мишин В.В., Цэгмэд Б.* // Косм. иссл. 2014. Т. 52. № 6. С. 459; *Klibanova Yu.Yu., Mishin V.V., Tsegmed B.* // Cosmic Res. 2014. V. 52. No. 6. P. 421.
8. *Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Шотт Ж.Ж.* // Геомагн. и аэроном. 2003. Т. 43. № 3. С. 321; *Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Shott J.-J.* // Geomagn. Aeron. 2003. V. 43. No. 3. P. 299.
9. *Бархатов Н.А., Виноградов А.Б., Ревунова Е.А.* // Косм. иссл. 2014. Т. 52. № 4. С. 286; *Barkhatov N.A., Vinogradov A.B., Revunova E.A.* // Cosmic Res. 2014. V. 52. No. 4. C. 269.

ULF disturbances caused by interplanetary magnetic clouds sheath

O. M. Barkhatova[a], *, V. G. Vorobjev[b], N. A. Barkhatov[c], S. E. Revunov[c]

[a]*Nizhniy Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhniy Novgorod, 603000 Russia*

[b]*Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia*

[c]*Kozma Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University, Nizhny Novgorod, 603002 Russia*

**e-mail: o.barkhatova@inbox.ru*

Simultaneous disturbances of the total electronic content and the horizontal component of the geomagnetic field in the range of Pc6 periods occurring during the intervals of interaction of the Earth's magnetosphere with the turbulent shell of magnetic clouds were registered during the periods of magnetospheric substorms. Wavelet analysis of perturbations of both the interplanetary magnetic field and the solar wind plasma velocity and density indicate the existence of fluctuations in the interplanetary medium with the similar periods.