

СОБЫТИЕ СИНХРОННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ И ГЕОМАГНИТНОМ ПОЛЕ НАД СТАНЦИЕЙ КАЗАНЬ

SYNCHRONIZATION OF GEOMAGNETIC AND IONOSPHERIC DISTURBANCES OVER KAZAN STATION

О.М. Бархатова

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,

Ниžний Новгород, Россия, o.barkhatova@inbox.ru

Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина,

Ниžний Новгород, Россия, o.barkhatova@inbox.ru

Н.В. Косолапова

Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина,

Ниžний Новгород, Россия, natashakosolapova@mail.ru

Н.А. Бархатов

Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина,

Ниžний Новгород, Россия, nbarkhatov@inbox.ru

С.Е. Ревунов

Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина,

Ниžний Новгород, Россия, revunov@inbox.ru

O.M. Barkhatova

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,

Nizhny Novgorod, Russia, o.barkhatova@inbox.ru

Kozma Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University, Nizhny Novgorod, Russia, o.barkhatova@inbox.ru

N.V. Kosolapova

Kozma Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University, Nizhny Novgorod, Russia, natashakosolapova@mail.ru

N.A. Barkhatov

Kozma Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University, Nizhny Novgorod, Russia, nbarkhatov@inbox.ru

S.E. Revunov

Kozma Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University, Nizhny Novgorod, Russia, revunov@inbox.ru

Аннотация. Выполнен анализ явлений, сопровождающих событие синхронной ночной ионосферной и геомагнитной возмущенности в УНЧ-диапазоне с периодами 35–50 мин в районе среднеширотной станции Казань в глобально-магнитоспокойное время. Сопоставление динамических спектров и вейвлет-картин изучаемой возмущенности показало совпадающие спектральные особенности одновременных возмущений критической частоты слоя F2 и H -, D -, Z -компонент геомагнитного поля. Принадлежность рассматриваемых возмущений к классу быстрых магнитозвуковых волн установлена изучением спектральных особенностей критической частоты слоя F2 над Казанью и возмущений H - и D -компонент геомагнитного поля на магнитных станциях, отличающихся от Казани по долготе и широте. Анализ параметров солнечного ветра, межпланетного магнитного поля (ММП) и значений аврорального индекса AL в рассматриваемом временном интервале показал, что изучаемое событие связано с возмущенностью B_z -компоненты ММП и происходит в условиях развития суббури.

Ключевые слова: возмущения ионосферы, возмущения геомагнитного поля, межпланетное магнитное поле, суббури, магнитогидродинамические возмущения.

Abstract. We have analyzed the phenomena which accompany synchronization of night-time ionospheric and geomagnetic disturbances in an ULF range with periods 35–50 min near the mid-latitude station Kazan during a global magnetically quiet period. The comparison between dynamic spectra and wavelet patterns of these disturbances has revealed that spectral features of simultaneous disturbances of the F2-layer critical frequency and H , D , Z geomagnetic field components are similar. By studying spectral features of the F2-layer critical frequency over Kazan and disturbances of the H and D geomagnetic field components at magnetic stations which differ from Kazan in longitude and latitude, we have established that the disturbances considered belong to the class of fast magnetosonic waves. The analysis of solar wind parameters, interplanetary magnetic field (IMF), and values of the auroral index AL in the period under study has shown that this event is associated with IMF B_z component disturbances and occurs during substorm development.

Keywords: ionospheric disturbances, geomagnetic field disturbances, interplanetary magnetic field, substorm, magnetohydrodynamic disturbances.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач исследования ионосферной и геомагнитной возмущенности является установление естественных и искусственных источников волн магнитогидродинамической (МГД) природы. К настоящему времени известно, что магнитосфера

Земли является природным резонатором для альвеновских, быстрых (БМЗ) и медленных магнитозвуковых (ММЗ) волн [Гульельми, Троицкая, 1973]. Распространение альвеновских и ММЗ-волн привязано к геомагнитному полю и при их отражении от проводящей ионосферы в магнитосфере возникают

стоящие МГД-волны. Источниками этих волн в магнитосфере Земли может быть быстрый магнитный звук. В свою очередь, БМЗ-волны могут проникать в магнитосферу из солнечного ветра (СВ) или генерироваться неустойчивостью Кельвина—Гельмгольца на магнитопаузе при обтекании потоком СВ [Мишин, Томозов, 2014]. Скорость распространения МГД-возмущений в магнитосфере может изменяться в пределах от сотен до тысяч километров в секунду. С подобными колебаниями в настоящее время связывают геомагнитные пульсации — ультранизкочастотные (УНЧ) периодические магнитосферные возмущения, частотный диапазон которых составляет от 1 мГц до 5 Гц.

Появление МЗ-волн в магнитосферно-ионосферной среде часто связывают с развитием геомагнитной бури. Например, в работе [Vorontsova et al., 2016] на фазе восстановления сильной магнитной бури были обнаружены геомагнитные пульсации диапазона Pc5, во время которых по GPS-данным было отмечено увеличение полного электронного содержания (ПЭС) на высоте слоя F2. Авторы высказали предположение, что за одновременные плазменные и геомагнитные возмущения может быть ответственна МЗ-волна. Однако возбуждение МГД-волн в магнитосфере и проводящих слоях ионосферы необязательно может быть связано с развитием глобальных геомагнитных возмущений. Например, авторами работ [Бархатова и др., 2009; Barkhatova et al., 2015] были обнаружены волны МЗ-типа, генерируемые восточным электроджетом и землетрясениями большой магнитуды. При этом наряду с возмущениями геомагнитного поля в УНЧ-диапазоне отмечались синхронные возмущения в проводящем слое F2 ионосферы.

Основной целью настоящего исследования является анализ явлений, сопровождающих событие синхронной ночной ионосферной и магнитной возмущенности, отмеченное в глобально-магнитоспокойное время по минутным данным среднеширотной станции Казань. Рассматриваемое явление имело кратковременный характер и наблюдалось в течение 50 мин в частотном диапазоне от 0.5 до 1 мГц (периоды 15–30 мин), т. е. в области УНЧ-колебаний. Отмеченная синхронизация дает основания полагать, что обнаруженные возмущения имеют МЗ-природу. Для определения характерных параметров этих ионосферных и магнитных возмущений были использованы методы динамического и спектрального вейвлет-анализа, достаточные для установления диапазона частот и моментов их синхронизации. В моменты возникновения рассматриваемой МЗ-возмущенности в районе ст. Казань изучены вариации геомагнитного поля на станциях, удаленных от нее по долготе и широте. С целью поиска причин рассматриваемой возмущенности во время ее регистрации выполнен анализ внемагнитосферных процессов, включающих изменения динамики компонент ММП, скорости и концентрации протонов в СВ. Определена связь обнаруженной ионосферной и магнитной возмущенности с суббуревой активностью, определяемой по значениям AL -индекса.

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Возможности поиска синхронных ионосферных и геомагнитных возмущений на ст. Казань (55.78° N,

49.01° E) определялись наличием ионосферных данных вертикального зондирования с минутным разрешением за 1–15 сентября 2014 г. Анализ проводился по данным критической частоты ионосферного слоя F2 и H -, D -, Z -компонент геомагнитного поля.

В пределах рассматриваемого интервала отмечалась геомагнитная буря продолжительностью более трех суток ($Dst_{\min} = -75$ нТл). Она имела фазу внезапного начала (SSC) длительностью 3 ч, главную фазу продолжительностью 4 ч (12 сентября, 20:00 UT — 13 сентября, 00:00 UT) и фазу восстановления длительностью более двух суток (13 сентября, 00:00 UT — 15 сентября, 07:00 UT). Значения индекса Dst за весь рассматриваемый интервал приведены на рис. 1. Согласно данным, в остальные дни (1–11 сентября) геомагнитная обстановка оставалась спокойной.

Отметим, что с 4 по 12 сентября выполнялись эксперименты по импульсному нагреву ионосферы мощным радиоизлучением на стенде СУРА (Васильсурск). В этой связи предполагалось, что в ионосфере возможно появление плазменных неоднородностей искусственного происхождения. С целью исключения подобных возмущений для исследования был выбран интервал с 1 по 4 сентября, в пределах которого нагревный стенд не работал, а глобальная геомагнитная обстановка оставалась спокойной.

Особенности пространственно-временного распределения МЗ-волн были выявлены широтно-долготным анализом вариаций компонент геомагнитного поля. Для этого был выбран ряд магнитных станций, удаленных от ст. Казань по широте и долготе. Список магнитных станций приведен в таблице.

2. ОБНАРУЖЕНИЕ МАГНИТОЗВУКОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В СПОКОЙНОЙ НОЧНОЙ ИОНОСФЕРЕ

Поиск одновременных ионосферных и геомагнитных возмущений в рамках исследования динамических спектров критической частоты и компонент магнитного поля показал, что 1, 2 и 4 сентября они не имели совпадающих спектральных особенностей в разрешенном диапазоне частот до 8 мГц. В качестве примера на рис. 2 представлены динамические спектры критической частоты f_oF_2 для 2 и 4 сентября 2014 г. Согласно приведенным спектрам, в ночной области по местному времени (+3 GMT) выраженная ионосферная возмущенность вообще отсутствует.

Вместе с тем, 3 сентября 2014 г. в местное ночное время 03:30–05:00 LT (00:30–02:00 UT) на динамическом спектре критической частоты слоя F2 были отмечены серии возмущений с характерными частотами в диапазоне от 0.3 до 4 мГц. Важным обстоятельством является одновременное появление серий подобных возмущений в компонентах геомагнитного поля в том же диапазоне частот. На рис. 3 показаны динамические спектры критической частоты слоя F2 и H -, D -, Z -компонент геомагнитного поля для 3 сентября 2014 г. Черными овалами отмечены области совпадения спектральных особенностей

Название станции	Географическая широта	Географическая долгота	L-оболочка
Sodankylä	67.37° N	26.63° E	5.3
Port Alfred	46.43° S	51.87° E	2.8
Казань	55.78° N	49.01° E	2.6
Hel	54.61° N	18.82° E	2.5
San Fernando	36.67° N	5.50° W	1.3

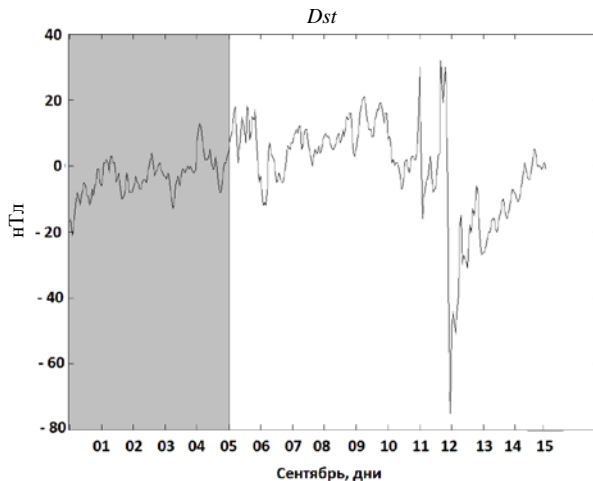


Рис. 1. Значения индекса Dst на интервале 1–15 сентября 2014 г. Серым цветом выделен исследуемый интервал

стей критической частоты и компонент геомагнитного поля.

Совпадения спектральных особенностей демонстрируют событие синхронной ионосферной и геомагнитной возмущенности в области ночной ионосферы. Однако динамические фурье-спектры недостаточно информативны при определении параметров реального волнового процесса. В этой связи дальнейшее исследование возможной синхронизации параметров обнаруженных возмущений было проведено с помощью анализа вейвлет-спектров. Отметим, что выбор базиса вейвлет-анализа для использования в разложении на время–частоту влияет на итоговое разрешение результата по времени и по частоте. Вместе с тем, выбором базисной функции невозможно изменить основные характеристики вейвлет-преобразования (низкие частоты имеют хорошее разрешение по частотам и плохое по времени, высокие — наоборот), но можно несколько увеличить общее разрешение по частотам или по времени. Общий принцип построения базиса вейвлет-преобразования состоит в использовании масштабного преобразования и смещений. За счет изменения масштабов с помощью вейвлетов можно выявить различие в характеристиках на разных шкалах и путем сдвига проанализировать свойства сигнала в разных точках на всем изучаемом интервале. В настоящем исследовании применены базисные вейвлет-функции Добеши 4 порядка. Вейвлеты Добеши — это семейство вейвлетов, вычисляемых итерационным путем. Особенности вычисления вейвлет-спектра в виде системы уравнений $\phi(t)$ и $\psi(t)$ позволяют получить в конечном итоге два вектора, один из которых содержит сглаженную версию сигнала, а другой — набор локальных особенностей.

Такой подход упрощает выявление характерных свойств исходного ряда данных, поскольку позволяет не только определить характер и динамические параметры сигнала, но и точно локализовать его особенности: выбросы, резкие скачки уровня и т. д.

Применяемый базисный вейвлет описывается системой уравнений

$$\begin{cases} \phi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_k \phi(2t - k) \\ \psi(t) = \sqrt{2} \sum_k g_k \phi(2t - k), \end{cases}$$

где функция $\phi(t)$ описывает масштабирование вейвлета (scaling function), а функция $\psi(t)$ характеризует форму волнового пакета. Расчет системы для каждой точки в момент времени t связан с вычислением коэффициентов h_k и g_k тригонометрического полинома итерационным каскадным алгоритмом. На рис. 4 показана временная развертка найденных функций 4 порядка.

На рис. 5 представлены вейвлет-спектры критической частоты f_oF2 и H -, D -компонент геомагнитного поля для ст. Казань, вычисленные для 3 сентября 2014 г. в ночном интервале (от 00:00 до 02:00 UT). Черными стрелками показаны совпадения максимумов ионосферных и геомагнитных возмущений H -компоненты в интервале 01:17–01:55 UT. Наилучшее совпадение рассматриваемых возмущений было отмечено для периодов от 15 до 30 мин. На рис. 5 не приведен вейвлет-спектр для Z -компоненты геомагнитного поля, поскольку в указанный временной интервал ее спектральные максимумы не совпадают с f_oF2 . Спектральные максимумы геомагнитных возмущений D -компоненты в рассматриваемом интервале опережают максимумы, отмечаемые для критической частоты и H -компоненты. В дальнейшем поиск синхронной ионосферной и геомагнитной возмущенности выполнялся на данных частоты f_oF2 и горизонтальной H -компоненты геомагнитного поля.

Согласно представленным результатам, для рассматриваемого интервала характерны синхронные возмущения в ионосфере и геомагнитном поле. Характерные периоды обнаруженных МЗ-возмущений принадлежат УНЧ-диапазону и находятся в интервале 35–50 мин. Факт совпадения особенностей одно-временных возмущений f_oF2 и компонент геомагнитного поля позволяет предположить их МЗ-природу.

3. ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАССМАТРИВАЕМЫХ МЗ-ВОЛН

Выше было отмечено, что генерация МЗ-волн в магнитосфере Земли может быть обусловлена вне- и внутримангнитосферными источниками. В любом слу-

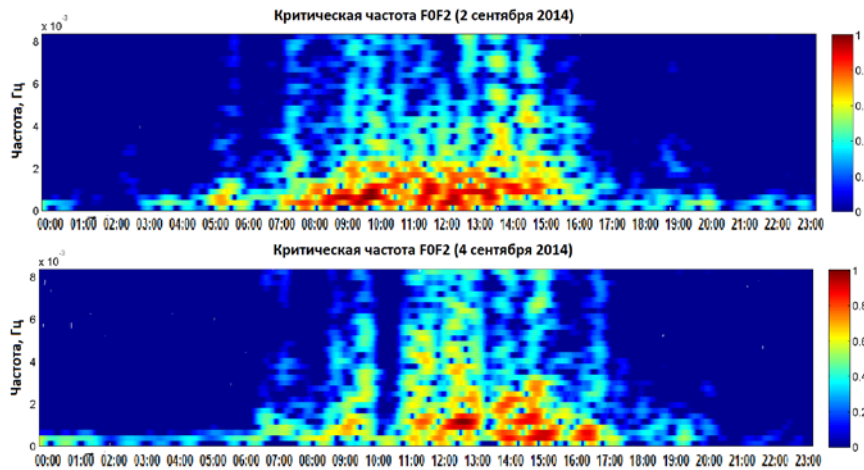


Рис. 2. Динамические спектры критической частоты слоя F2 для 2 сентября 2014 г. (верхняя панель) и 4 сентября 2014 г. (нижняя панель); время приведено в UT

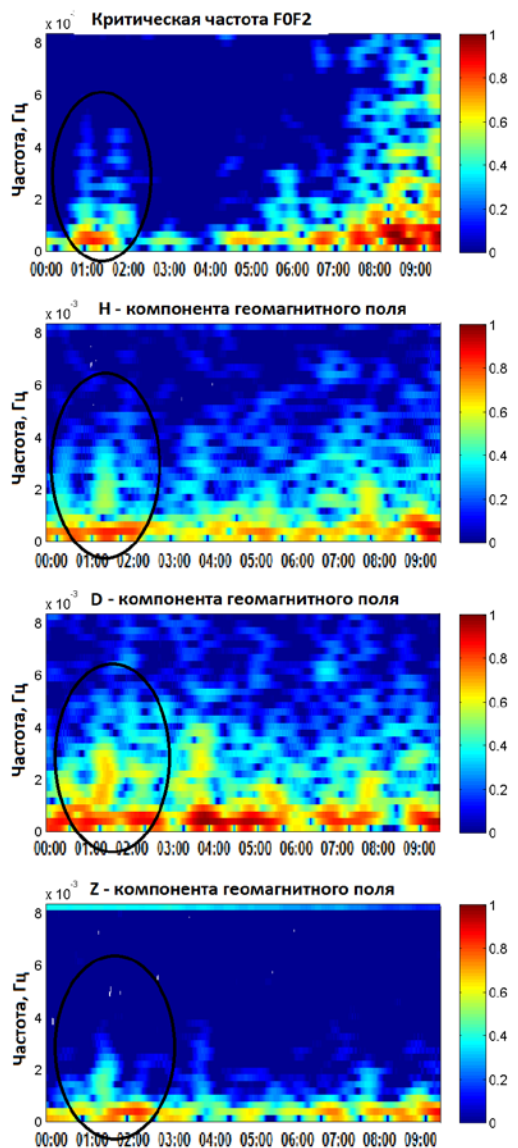


Рис. 3. Сверху вниз: динамические спектры критической частоты слоя F2, D-компоненты геомагнитного поля, H-компоненты и Z-компоненты для 3 сентября 2014 г. Черными овалами отмечены области совпадения спектральных особенностей

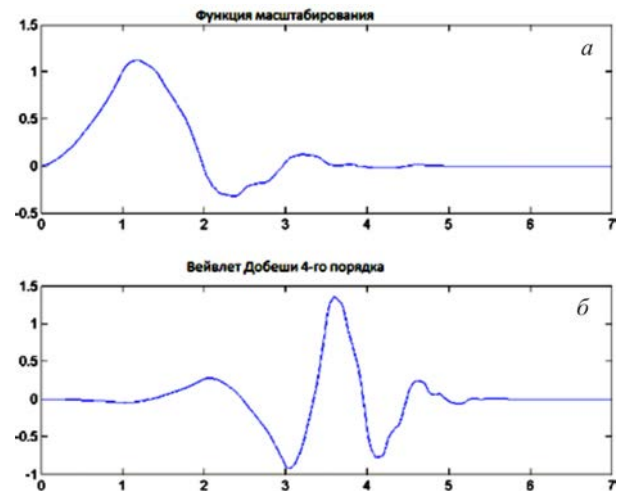


Рис. 4. Временная развертка функции масштабирования (а) и функции вейвлета Добеши 4 порядка (б)

чае в рассматриваемый ультранизкочастотный волновой процесс вовлекается вся магнитосфера. Наиболее близкой по долготе к Казани станцией является обсерватория Port Alfred (46.4° S, 51.8° E), которая располагается в магнитоспряженной точке. На рис. 6 представлены спектры критической частоты (Казань) и H-компоненты геомагнитного поля, вычисленные по минутным данным обсерватории Port Alfred для 3 сентября 2014 г. в интервале от 00:00 до 02:00 UT. Черными стрелками показаны совпадения максимумов ионосферных и геомагнитных возмущений H-компоненты в интервале периодов 15–30 мин.

Полученный результат совпадения спектральных максимумов критической частоты на ст. Казань и H-компонент геомагнитного поля на обсерваториях Казань и Port Alfred, находящихся в магнитоспряженных точках, свидетельствует о привязке изучаемого волнового явления к соответствующей геомагнитной силовой линии.

Вопрос о принадлежности рассматриваемых волн к классу ММЗ, которые привязаны к силовой линии геомагнитного поля, или к классу изотропных БМЗ может быть решен анализом вейвлет-спектров возмущений, зарегистрированных на станциях, име-

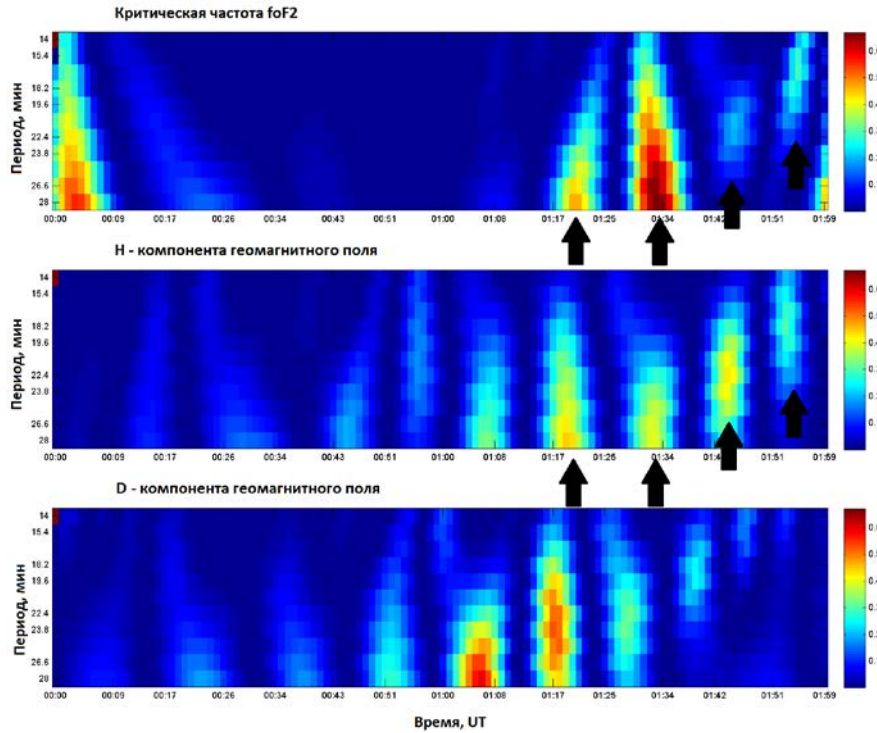


Рис. 5. Сверху вниз: вейвлет-спектры критической частоты слоя F2, H -компоненты геомагнитного поля и D -компоненты геомагнитного поля для 3 сентября 2014 г. Черными стрелками отмечено соответствие между максимумами спектров в рассматриваемом интервале периодов между возмущениями f_oF_2 и H -компоненты

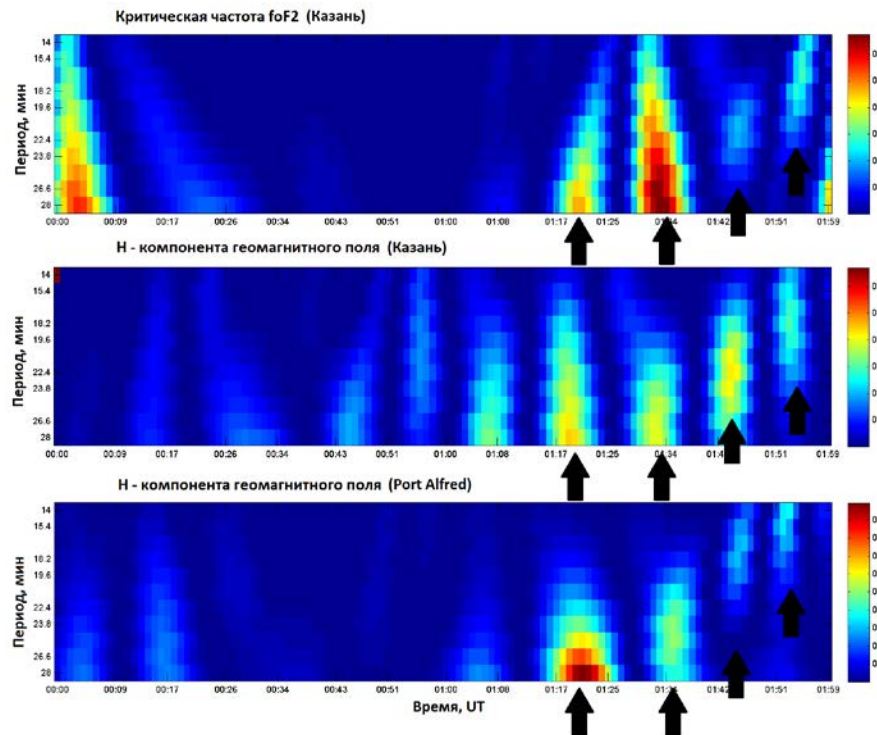


Рис. 6. Сверху вниз: вейвлет-спектры критической частоты слоя F2, зарегистрированной на ст. Казань, H -компоненты геомагнитного поля на ст. Казань и H -компоненты геомагнитного поля на ст. Port Alfred для 3 сентября 2014 г. Черными стрелками отмечено соответствие между максимумами спектров в рассматриваемом интервале периодов

ющих отличные от Казани долготы. На рис. 7 показаны вейвлет-спектры критической частоты f_oF_2 над Казанью, а также горизонтальных и азимутальных компонент геомагнитного поля на станциях, выбранных в интервале широт $36\text{--}67^\circ\text{ N}$ (см. таблицу).

Согласно представленным на рис. 7 (левая панель) данным, первые три из рассматриваемых

спектральных максимумов критической частоты (Казань, $L=2.6$) имеют совпадения с максимумами H -компоненты геомагнитного поля на магнитных станциях другой долготы. Первый максимум f_oF_2 на ст. Казань ($\sim 01:17$ UT) совпадает с максимумом H -компоненты низкоширотной станции San Fernando, второй максимум ($\sim 01:34$ UT) — с максимумом

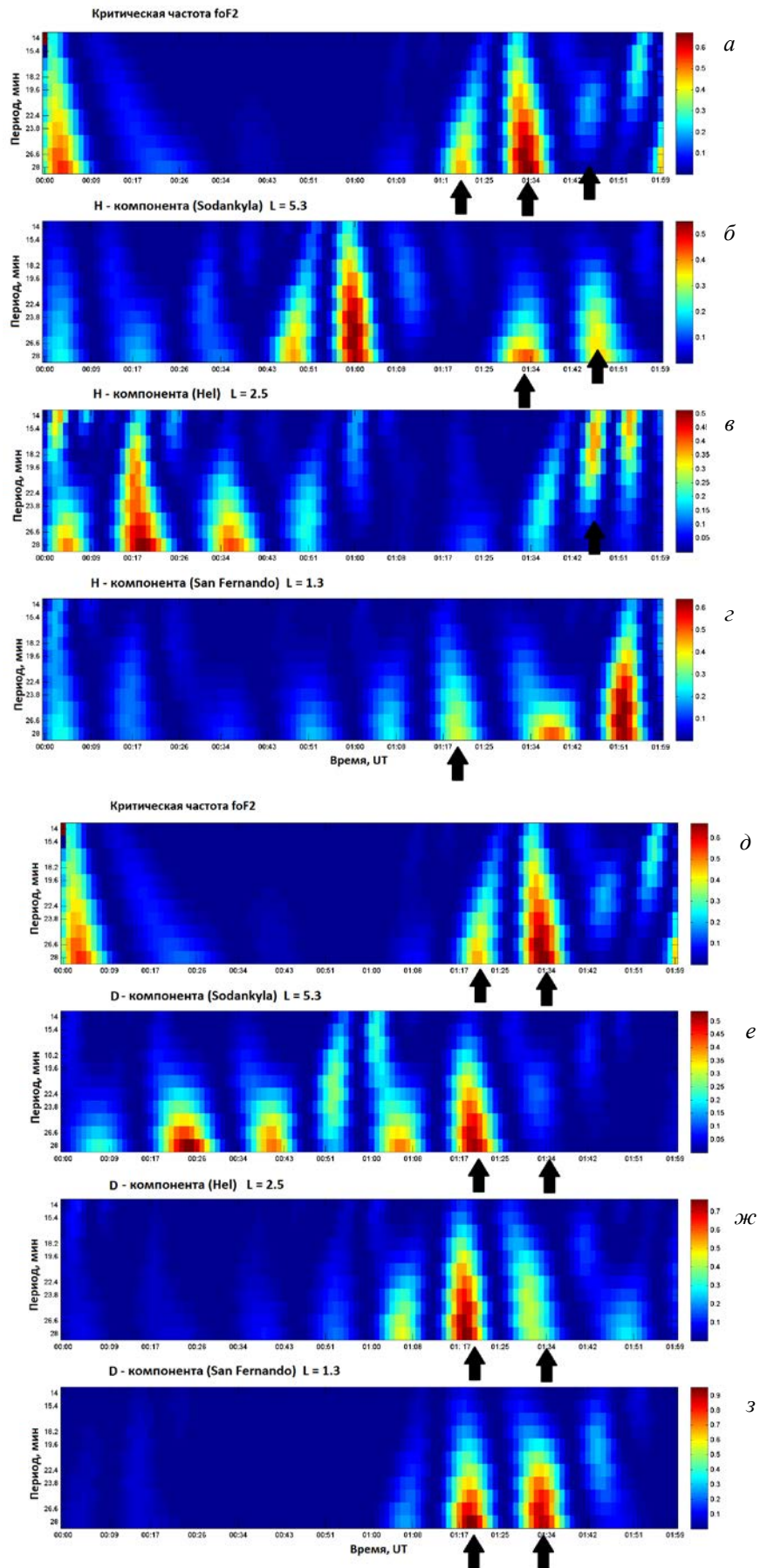


Рис. 7. Вейвлет-спектры критической частоты f_oF_2 на ст. Казань (а, д), H -компонент геомагнитного поля (б–з) и D -компонент геомагнитного поля (е–з) на ст. Sodankyla, Hel и San Fernando. Стрелками отмечены совпадения исследуемых возмущений f_oF_2 в Казани и компонент магнитного поля на выбранных станциях

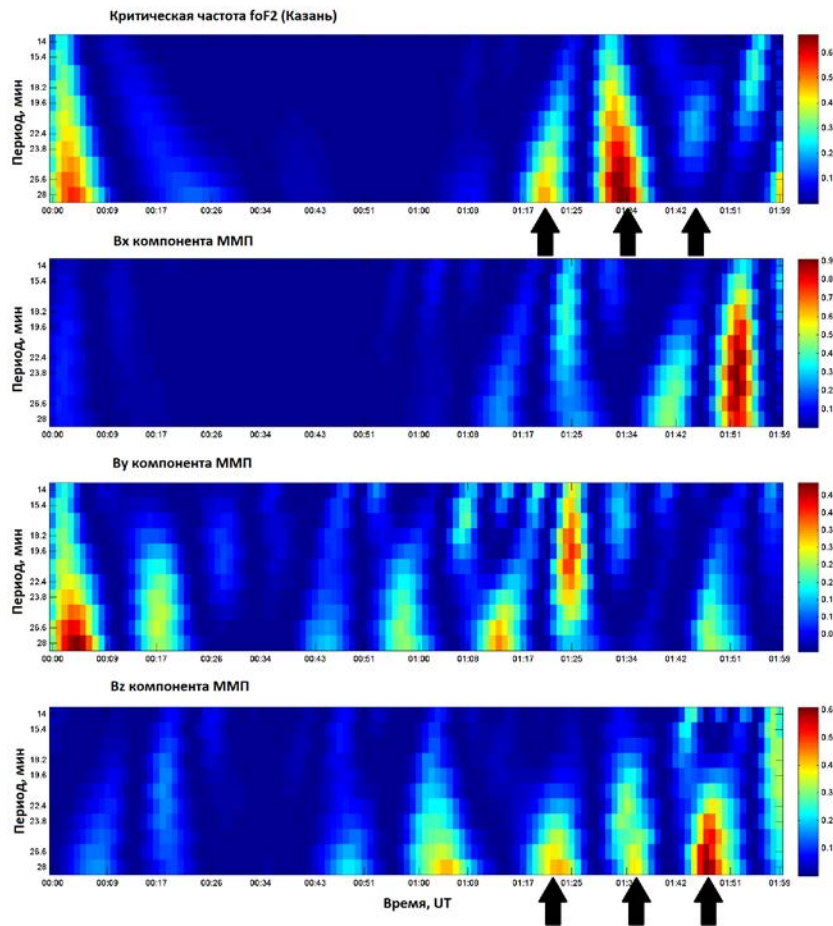


Рис. 8. Вейвлет-спектры возмущений критической частоты ионосферного слоя F2 и B_x -, B_y -, B_z -компонент ММП для 3 сентября 2014 г. Стрелками указаны области совпадений спектральных особенностей критической частоты f_0F_2 и B_z -компоненты ММП

мом на высокоширотной станции Sodankyla, третий максимум f_0F_2 (~01:45 UT) — с максимумами H -компоненты на высокоширотной и среднеширотной станциях Sodankyla и Hel. Отметим, что все указанные возмущения f_0F_2 на среднеширотной станции Казань находят отражение в горизонтальной магнитной компоненте станций, находящихся на других широтах и долготах по отношению к ст. Казань.

Анализ возмущений азимутальной D -компоненты геомагнитного поля на рассматриваемых станциях (рис. 7, правая панель) показывает, что первые два казанских максимума f_0F_2 (~01:17 UT и 01:34 UT) находят свое отражение в D -компонентах на всех других рассматриваемых магнитных станциях, расположенных почти вдоль одного магнитного меридиана.

Таким образом, в интервале ~01:17–01:45 UT наблюдаются возмущения, регистрируемые в горизонтальной компоненте геомагнитного поля на станциях Казань, Sodankyla, Hel и San Fernando, в пределах большой пространственной области. Это позволяет отнести их к классу БМЗ-возмущений.

4. ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ МЗ-ВОЗМУЩЕННОСТИ НОЧНОЙ ИОНОСФЕРЫ

Выше было отмечено, что обнаруженная синхронность ионосферной и геомагнитной возмущенности может объясняться прохождением МЗ-волн

через исследуемую область в окрестности ст. Казань. Выполним поиск возможных причин рассматриваемой возмущенности. Внемагнитосферной причиной могут быть низкочастотные колебания, регистрируемые в СВ в диапазоне 15–30 мин и возникающие в нем вследствие магнитогравиационной возмущенности, связанной с солнечной активностью. Такие колебания в параметрах СВ и ММП могут быть ответственны за возникновение магнитосферно-ионосферных колебаний, проявляющихся в синхронной возмущенности критической частоты слоя F2 и компонент геомагнитного поля. Анализ параметров возмущений скорости СВ V , протонной концентрации P , а также компонент B_x , B_y и B_z ММП в рассматриваемом диапазоне частот выполнялся в пределах исследуемого временного интервала с помощью спектрального вейвлет-анализа. Полученные вейвлет-спектры сопоставлялись с обнаруженными ранее возмущениями критической частоты и геомагнитного поля на ст. Казань.

На рис. 8 представлены вейвлет-спектры критической частоты f_0F_2 на ст. Казань (верхняя панель) и B_x -, B_y -, B_z -компонент ММП для рассматриваемого временного интервала. Стрелками отмечены области синхронизации возмущений указанных параметров. Согласно полученным результатам, наблюдается совпадение спектральных особенностей для критической частоты f_0F_2 и B_z -компоненты ММП в интервале периодов 15–30 мин. Для компонент B_x и B_y ,

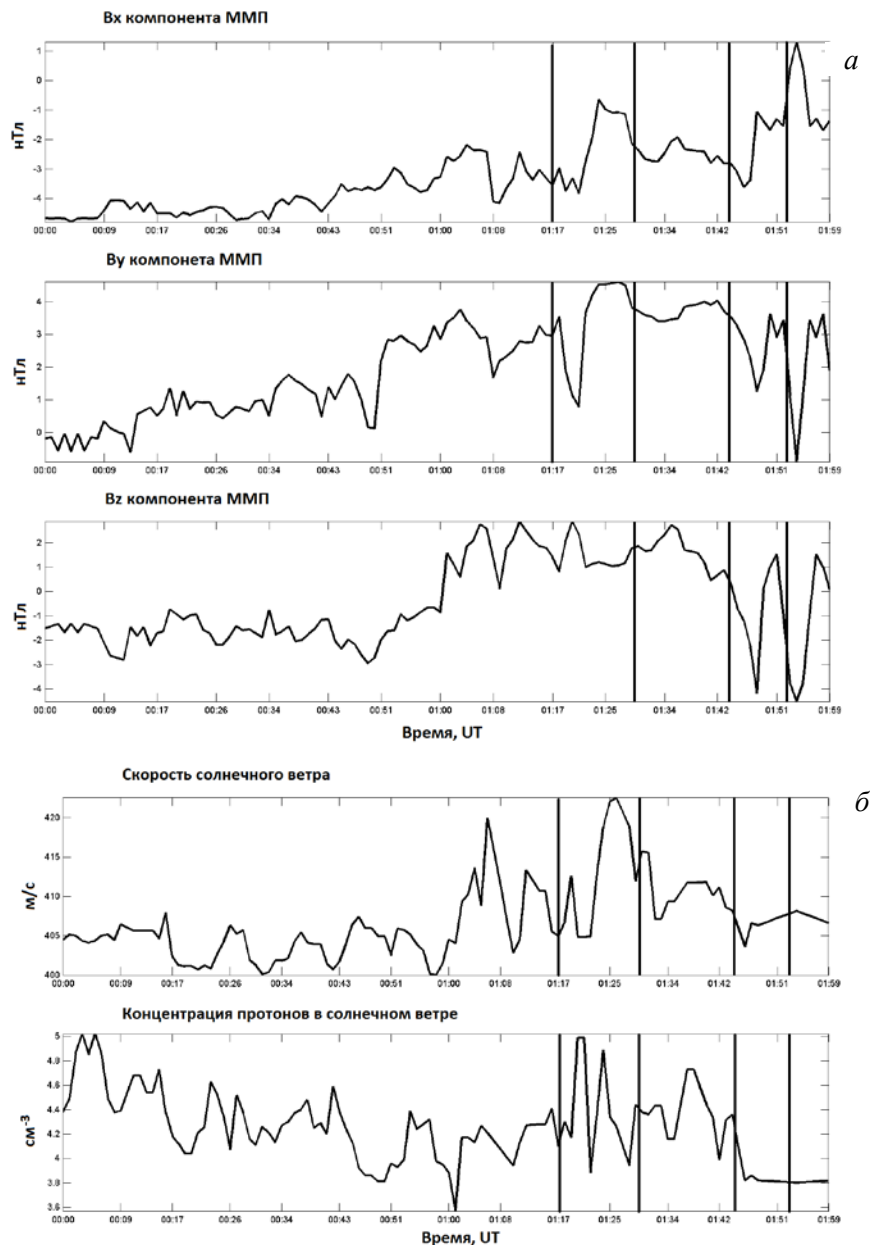


Рис. 9. V_x -, V_y -, V_z -компоненты ММП (а), скорость и концентрация солнечного ветра (б) в 00:00–02:00 UT для 3 сентября 2014 г. Вертикальными черными линиями отмечены моменты совпадений спектральных особенностей f_oF_2 и H -компоненты геомагнитного поля на ст. Казань

ММП подобные совпадения отсутствуют. Это позволяет предположить, что возникновение рассматриваемых возмущений в ночной области ионосферы может быть связано с длиннопериодными колебаниями вертикальной компоненты ММП.

Известно, что ориентация и величина V_z -компоненты во многом определяют глобальную и высокоширотную геомагнитные возмущенности. На последнее обстоятельство обращено внимание, например, в работе [McPherron et al., 1973], где отмечается, что фаза зарождения суббури тесно связана с поворотом на юг V_z -компоненты ММП. В этот период происходит накопление энергии в хвосте магнитосферы, которая затем сменяется ее диссипацией на фазе развития суббури. В исследовании [Lyons, 1996] высказано предположение, что большинство магнитосферных суббур вызываются уменьшением

крупномасштабного электрического поля, переносимого в магнитосферу из СВ. Основной причиной уменьшения электрического поля является поворот на север вертикальной компоненты ММП. Вместе с тем, в работе [Henderson et al., 1996] отмечено наличие суббур, возникающих и при отсутствии заметных резких изменений в параметрах СВ и ММП. Таким образом, на данный момент остается дискуссионным вопрос о влиянии направления V_z -компоненты ММП, ее величины и продолжительности сохранения определенных значений на процессы зарождения суббури. Особенности связи этой компоненты с суббуревой активностью магнитосферы отмечаются во многих работах, например [Бархатов и др., 2017; Воробьев и др., 2016; Henderson et al., 1996].

Таким образом, возникновение ионосферной и геомагнитной возмущенности в ночном секторе маг-

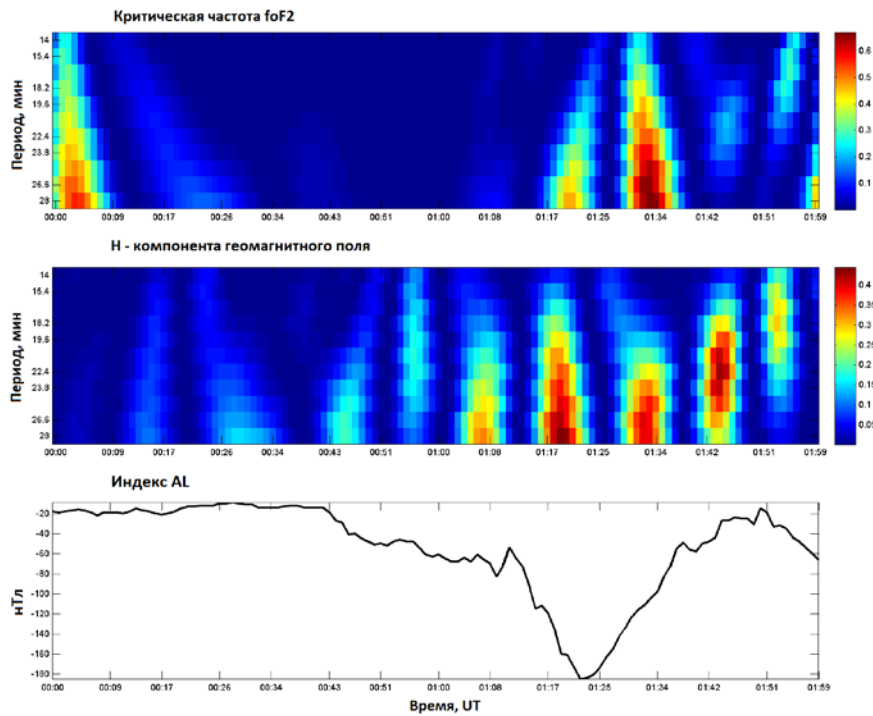


Рис. 10. Сверху-вниз: вейвлет-спектры возмущений критической частоты f_oF_2 , H -компоненты геомагнитного поля и вариации индекса AL для 3 сентября 2014 г.

ионосферы может быть вызвано развитием высокоширотных суббуревых процессов. При этом параметры СВ и ММП имеют особое поведение, что позволяет выделить этапы начала, развития и распада авроральной суббури. В этой связи был выполнен анализ динамики B_x -, B_y - и B_z -компонент ММП (левая панель) и параметров СВ (концентрации протонов и скорости) (правая панель) на изучаемом временном интервале. На рис. 9 черными вертикальными линиями отмечены моменты совпадений спектральных особенностей f_oF_2 и H -компоненты геомагнитного поля на ст. Казань.

Изучение временного хода вариаций концентрации протонов в СВ показывает, что до 00:45 UT (+3 GMT Казань) наблюдаются ее повышенные значения с дальнейшей тенденцией к снижению и достижением минимального значения в 01:00 UT. В 01:00–02:00 UT имеет место общее увеличение скорости СВ, сохраняющиеся на протяжении всего интервала. Кроме того, в ~01.00 UT происходит переход значений B_z -компоненты от небольших отрицательных величин к положительным. Именно такая ситуация, согласно [Бархатов и др., 2017; Morley, Freeman, 2007], соответствует условиям развития суббури.

Вместе с тем, интервалы суббуревой активности можно выделить, анализируя временной ход индексов авроральной активности (AU , AL). Рассматриваемый временной интервал соответствует ночному сектору магнитосферы, в котором локализован западный электроджет (AL). На рис. 10 сопоставлены вейвлет-спектры критической частоты f_oF_2 и горизонтальной компоненты геомагнитного поля на ст. Казань с вариациями индекса AL . Исследуемые ионосферные возмущения, сопровождающиеся соответствующими возмущениями компонент геомагнитного поля, находятся в интервале 01:17–01:55 UT.

Динамика индекса AL показывает, что в рассматриваемый период имеет место бухтообразное возмущение, которому предшествует спокойный период ($AL \sim -20$ нТл). В 00:43–01:20 UT значения индекса снижаются с достижением минимума ~ -180 нТл, а затем плавно возрастают в течение получаса до значений ~ -20 нТл.

Подобная динамика свидетельствует о развитии суббуревой активности в авроральной области ночной ионосферы. Все исследуемые синхронные возмущения критической частоты f_oF_2 и геомагнитного поля находятся в пределах суббури.

Таким образом, спектральный анализ компонент ММП и параметров СВ показал, что внемагнитосферным источником рассматриваемой ионосферной и геомагнитной МЗ-возмущенности могут являться возмущения B_z -компоненты ММП. Это происходит на фоне увеличения скорости СВ и опережающего увеличения концентрации протонов. Такая ситуация в ММП и СВ и отвечает условиям развития суббури.

Одновременно с суббурей происходит вытягивание силовых линий в геомагнитный хвост, которые подвергаются сверхнизкочастотной вибрации возмущенным замагниченным СВ. Тогда одним из источников МЗ-волн в рассматриваемом диапазоне частот может быть суббуревая активность [Белаховский и др., 2015], вызываемая возмущениями в СВ. Обнаруженные нами на большой пространственной области МЗ-возмущения могут быть генерированы нестабильностью западного электроджета, который участвует в суббуревом процессе в качестве элемента крупномасштабной трехмерной токовой системы — токового клина суббури (Substorm Current Wedge, SCW).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований демонстрируют возможность существования в области средних широт в местное ночное время в глобальных геомагнитоспокойных условиях синхронной ионосферной и геомагнитной возмущенности в классе P₁₃-пульсаций. Это установлено сопоставлением спектральных картин критической частоты f_oF_2 над ст. Казань и компонент геомагнитного поля на большой пространственной области, включающей высокие, средние и низкие широты. Определена наиболее вероятная внемагнитосферная причина зарегистрированной МЗ-возмущенности, которая проявляется в суббуревое время и связана с вариациями B_z -компоненты ММП. Приведем кратко основные результаты работы:

1. Обнаружены совпадения спектральных особенностей динамических фурье-спектров критической частоты слоя F2 и H -, D -, Z -компонент на ст. Казань в ночное местное время (00:00–02:00 UT, 03:00–05:00 LT) для 3 сентября 2014 г. При этом 2 и 4 сентября в таких же геомагнитных условиях подобной возмущенности не наблюдается. Таким образом, продемонстрирована возможность возникновения синхронной ионосферной и геомагнитной возмущенности в области средних широт.

2. С помощью вейвлет-анализа определены характерные периоды обнаруженных возмущений, которые лежат в диапазоне УНЧ-колебаний и составляют от 15 до 30 мин. При этом совпадения спектральных особенностей на ст. Казань отмечаются для f_oF_2 и H -компоненты возмущений, что позволяет предположить их МЗ-природу.

3. Принадлежность рассматриваемых возмущений к классу БМЗ-волн установлена на основе анализа фактов совпадений спектральных особенностей f_oF_2 над Казанью с возмущениями H - и D -компонент геомагнитного поля на магнитных станциях, отличающихся от Казани по долготе и широте.

4. Обнаружена синхронизация отмеченной ранее ионосферной и геомагнитной возмущенности на ст. Казань с возмущениями B_z -компоненты ММП. Можно считать, что длиннопериодные колебания B_z -компоненты ММП находят свое отражение в среднширотной ионосфере и компонентах геомагнитного поля. Установлено, что в рассмотренном случае это явление возникает в суббуревой период.

Таким образом, существование синхронной ионосферной и геомагнитной возмущенности в ночном секторе среднширотной ионосферы может быть обусловлено внемагнитосферным источником, которым в рассматриваемом случае могут являться возмущения B_z -компоненты ММП. Происходящая при этом смена ориентации B_z -компоненты, увеличение скорости СВ и опережающее увеличение концентрации протонов, создает условия для развития суббури. Одновременно с развитием суббуревой активности происходит вытягивание силовых линий в геомагнитный хвост, которые оказываются возмущенными УНЧ-колебаниями замагниченного СВ. Обнаруженные на большой пространственной области БМЗ-возмущения могут быть генерированы

нестабильностью западного электроджета, связанной с развитием суббуревого процесса.

Выносим благодарность Акчурину А.Д. и Юсупову К.М. за предоставление данных ионосферного зондирования на ст. Казань.

Работа поддержана грантами РФФИ №16-05-00608, №16-35-00084 и выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки РФ № 5.5898.2017/8.9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И. Проявление динамики параметров солнечного ветра на формирование суббуревой активности // Геомагнетизм и аэрномия. 2017. Т. 57, № 3. С. 251–256.

Бархатова О.М., Бархатов Н.А., Григорьев Г.И. Обнаружение магнитогравитационных волн в ионосфере по анализу максимально наблюдаемых частот на трассах наклонного зондирования // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 10. С. 761–778.

Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Самсонов С.Н. Иррегулярные P₁₃ пульсации и их связь с потоками заряженных частиц в магнитосфере и ионосфере. Proc. XXXVIII Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”. Apatity. 2015. P. 71–74.

Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Зверев В.Л. Исследование изолированных суббурь: условия генерации и характеристики различных фаз // Геомагнетизм и аэрномия. 2016. Т. 56, № 6. С. 721–732. DOI: [10.7868/S001679401606016X](https://doi.org/10.7868/S001679401606016X).

Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973. С. 208.

Мишин В.В., Томозов В.М. Проявления неустойчивости Кельвина—Гельмгольца в атмосфере солнца, солнечном ветре и магнитосфере земли // Солнечно-земная физика. 2014. Вып. 25. С. 10–20.

Barkhatova O.M., Barkhatov N.A., Kosolapova N.V. Distribution of magnetogravity waves during strong earthquakes ($M > 6.5$) preparation periods // Geomagnetism and Aeronomy. 2015. V. 55, N 3. P. 369–377.

Henderson M.G., Reeves G.D., Belian R.D., Murphree J.S. Observations of magnetospheric substorms occurring with no apparent solar wind/IMF trigger // J. Geophys. Res. 1996. V. 101, N A5. P. 10773–10792.

Lyons L.R. Substorms: Fundamental observational features, distinction from other disturbances, and external triggering // J. Geophys. Res. 1996. V. 101, N A6. P. 13011–13026. DOI: [10.1029/95JA01987](https://doi.org/10.1029/95JA01987).

McPherron, R. L., Russell C. T., Aubry M.P. Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968: 9. Phenomenological model for substorms // J. Geophys. Res. 1973. V. 78, N 16. P. 3131–3149.

Morley S.K., Freeman M.P. On the association between northward turnings of the interplanetary magnetic field and substorm onsets // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34, L08104. DOI: [10.1029/2006GL028891](https://doi.org/10.1029/2006GL028891).

Vorontsova E., Pilipenko V., Fedorov E., et al. Modulation of total electron content by global Pc5 waves at low latitudes // Adv. Space Res. 2016. N. 57. P. 309–319.

REFERENCES

Barkhatov N.A., Vorobyev V.G., Revunov S.E., Yagodkina O.I. Effect of solar wind dynamics on substorm activity formation. *Geomagnetism i aeronomiya* [Geomagnetism and aeronomy]. 2017, vol. 57, no. 3, pp. 251–256. (In Russian).

Barkhatova O.M., Barkhatov N.A., Grigoryev G.I. Detection of magneto-gravity waves in the ionosphere from the analysis of maximum observed frequencies at oblique sounding paths. *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [Transactions of Higher

School: Radiophysics]. 2009, vol. 52, no. 10, pp. 761–778. (In Russian).

Barkhatova O.M., Barkhatov N.A., Kosolapova N.V. Distribution of magnetogravity waves during strong earthquakes ($M > 6.5$) preparation periods. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015, vol. 55, no. 3, pp. 369–377.

Belakhovsky V.B., Pilipenko V.A., Samsobov S.N. Irregular Pi3 pulsations and their correlation with charged particle fluxes in the magnetosphere and ionosphere. *Proc. XXXVIII Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena"*. Apatity. 2015, pp. 71–74. (In Russian).

Guglielmi A.V., Troitskaya V.A. Geomagnetic pulsations and diagnostics of the magnetosphere. Moscow, Nauka Publ., 1973, p. 208. (In Russian).

Henderson M.G., Reeves G.D., Belian R.D., Murphree J.S. Observations of magnetospheric substorms occurring with no apparent solar wind/IMF trigger. *J. Geophys. Res.* 1996, vol. 101, no. A5, pp. 10773–10792.

Lyons L.R. Substorms: Fundamental observational features, distinction from other disturbances, and external triggering. *J. Geophys. Res.* 1996, vol. 101, no. A6, pp. 13011–13026. DOI: 10.1029/95JA01987.

McPherron, R. L., Russell C. T., Aubry M.P. Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968: 9. Phenomenological model for substorms. *J. Geophys. Res.* 1973, vol. 78, no. 16, pp. 3131–3149.

Mishin V.V., Tomozov V.M. Manifestations of Kelvin–Helmholtz instability. *Solar-Terrestrial Physics*. 2014, iss. 25, pp. 10–20.

Morley S.K., Freeman M.P. On the association between northward turnings of the interplanetary magnetic field and substorm onsets. *Geophys. Res. Lett.* 2007, vol. 34, L08104. DOI: 10.1029/2006GL028891.

Vorobyev V.G., Yagodkina O.I., Zverev V.L. Research into isolated substorms: generation conditions and characteristics of different phases *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and aeronomy]. 2016, vol. 56, no. 6, pp. 721–732. DOI: 10.7868/S001679401606016X. (In Russian).

Vorontsova E., Pilipenko V., Fedorov E., et al. Modulation of total electron content by global Pc5 waves at low latitudes. *Adv. Space Res.* 2016, no. 57, pp. 309–319.

Как цитировать эту статью

Бархатова О.М., Косолапова Н.В., Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. Событие синхронных возмущений в ионосфере и геомагнитном поле над станцией Казань. *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 4. С. 63–73. DOI: 10.12737/szf-34201706.