

УДК: 550.388.2

СРЕДНЕШИРОТНЫЕ ЭФФЕКТЫ МАГНИТНОЙ БУРИ 17 МАРТА 2015 г.

***Б.Г. Гаврилов, Д.В. Егоров, В.М. Ермак, И.Э. Маркович,
Ю.В. Поклад, В.А. Рыбаков, И.А. Ряховский, В.В. Яким***

Для исследования динамики возникших в результате мощной геомагнитной бури 17 марта 2015 года ионосферных неоднородностей на средних широтах были использованы данные регистрации полного электронного содержания ионосферы и фазы радиосигналов ОНЧ диапазона от радиостанций, расположенных в различных районах Земли. Анализ изменения фаз СДВ радиосигналов совместно с данными измерения ПЭС является не только дополнительным инструментом для изучения динамики ионосферных возмущений, но и позволяет судить о возмущениях электронной плотности в различных слоях ионосферы.

Введение

17 марта 2017 года на Земле наблюдалась сильнейшая магнитная буря в нынешнем 24 цикле солнечной активности. В этот день празднуется День Св. Патрика, что и дало название этому уникальному событию (St. Patrick's Day magnetic storm). 15 марта на Солнце в пятне № 2297 произошла серия вспышек, в основном сред-

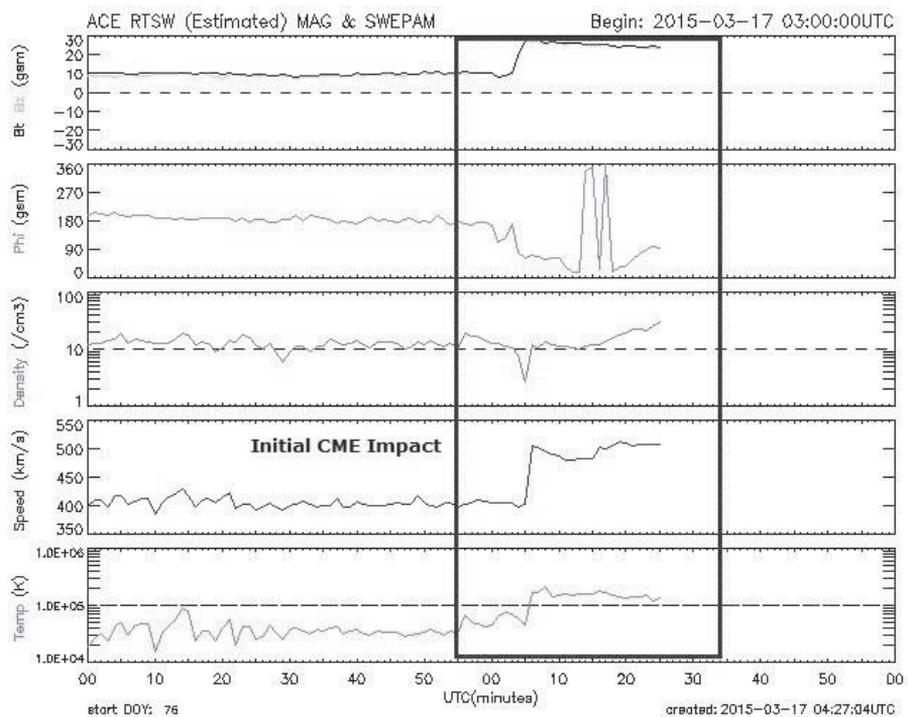


Рис. 1. Данные по изменению величины и ориентации магнитного поля, плотности, скорости и температуры протонов в солнечном ветре по данным спутника Advanced Composition Explorer (ACE) с 3 до 4 UT 17.03.2015 [<http://www.swpc.noaa.gov/products/ace-real-time-solar-wind>]

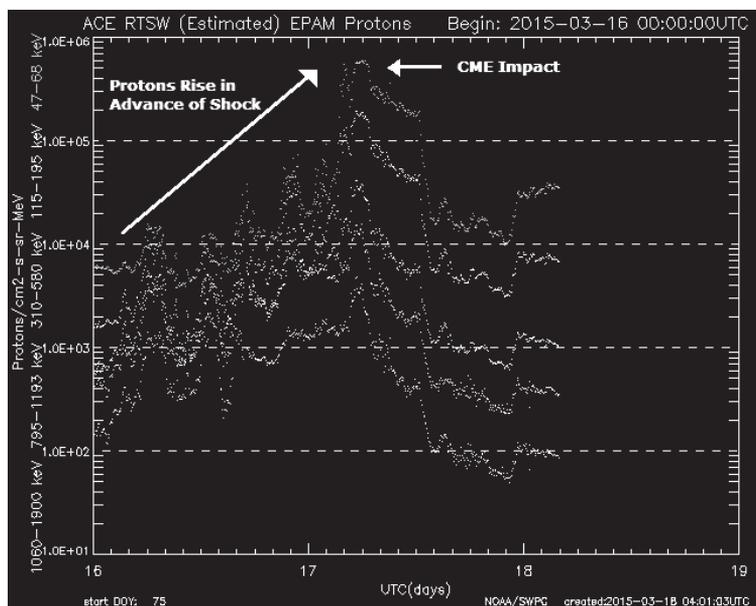


Рис. 2. Изменение потока протонов с различными энергиями по данным спутника ACE за 16–18 марта 2015 г. [<http://www.swpc.noaa.gov/products/ace-real-time-solar-wind>]

него класса, завершившаяся продолжительной вспышкой класса C9 в 02:13 UT. В 04:05 UT 17 марта космическим аппаратом ACE, находящимся в точке Лагранжа L1 на расстоянии 200 тысяч км от Земли, было зарегистрировано резкое возрастание скорости солнечного ветра до 500 км/с при северном направлении Vz компоненты межпланетного магнитного поля, что обычно не сопровождается значительными геомагнитными возмущениями на Земле. Однако через час произошел мощный выброс корональной массы при резком повороте вектора Vz на юг. В целом, наблюдавшаяся 17 марта буря являлась результатом наложения двух умеренных бурь, вызванных двумя последовательными возмущениями межпланетного магнитного поля южного направления [Kamide, Kusano, 2015]. Вероятно, движущиеся с разными скоростями возмущения солнечного ветра совпали вблизи орбиты Земли, что и вызвало сильнейшую геомагнитную бурю (рис. 1, 2). Наименьшее значение индекса геомагнитной активности Dst превышало 200 нТл, индекса авроральной активности AE 2200 и планетарного индекса геомагнитной активности Kp достигла значения 8 (рис. 3). Это позволяет отнести событие 17.03.2015 к экстремальным магнитным бурям.

Магнитометры спутников GOES 13 и 15, также как ACE находящиеся в первой точке либрации, зарегистрировали мощные возмущения межпланетного магнитного поля (рис. 4). По данным геофизической обсерватории (ГФО) ИДГ РАН «Михнево» (рис. 5) в момент максимальных возмущений (до 600 нТл) величина станционного индекса геомагнитной активности достигла 9. Буря вызвала генерацию значительных высыпаний, сопровождавшихся полярными сияниями, наблюдавшимися в северном полушарии до широты 48°. Отмеченные возмущения неизбежно должны были вызвать глобальные ионосферные возмущения.

Для выявления ионосферных эффектов, вызванных магнитными бурями, широко используются измерения полного электронного содержания ионосферы (ПЭС), по-

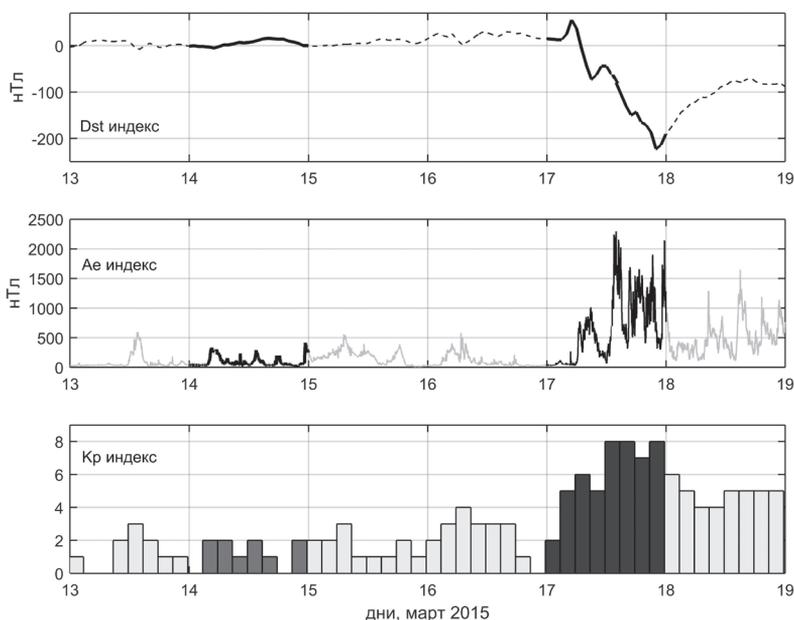


Рис. 3. Индексы геомагнитной активности Dst, авроральной активности AE и планетарный индекс геомагнитной активности Kp с 13 по 19 марта 2015 г. по данным wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc

лучаемые путем обработки данных мировых спутниковых навигационных систем [Афраймович, Астафьева и др., 2011]. ПЭС ионосферы определяется как количество электронов на пути распространения радиосигнала от навигационного спут-

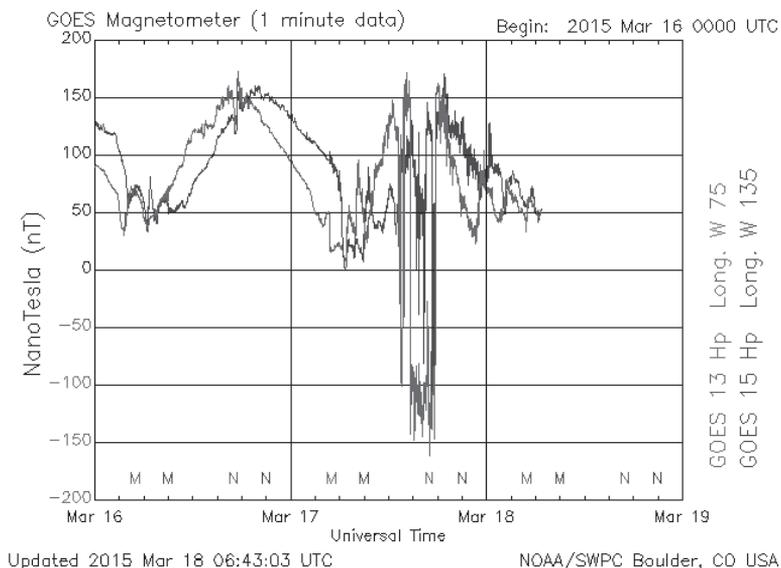


Рис. 4. Вариации межпланетного магнитного поля по данным спутника GOES (www.swpc.noaa.gov/products/goes-magnetometer) с 16 по 19 марта 2015 г.

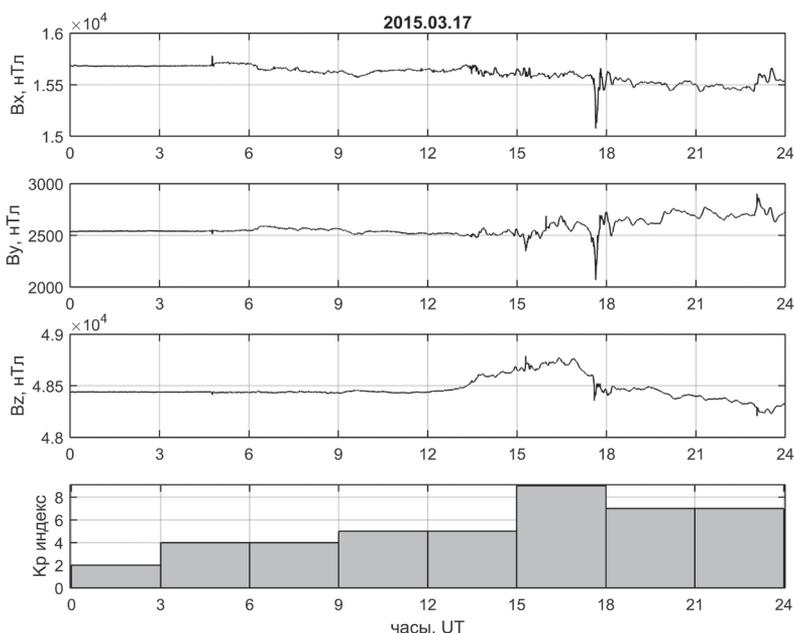


Рис. 5. Магнитограммы вариации геомагнитного поля 17.03.2015 по данным ГФО «Михнево» и стационарный индекс геомагнитной активности (нижняя панель)

ника, находящегося на высоте 20000 км, до приемника. Практически эта величина характеризует состояние F-слоя ионосферы, как дающего основной вклад в значение ПЭС. Эффект магнитных бурь в E- и D-слоях ионосферы исследованы значительно меньше. Это связано с невозможностью применения ионозондов и радаров для диагностики нижней ионосферы из-за ее малой плотности. В ряде работ [Han, Summer et al., 2011, Maurya, Veenadhari et al., 2012] описано использование для изучения нижней ионосферы радиосигналов ОНЧ диапазона. В качестве источника зондирующих сигналов используется излучение молниевых разрядов (сферики). Недостатком этого метода является невозможность выбора определенных трасс распространения сигналов.

В описанном в статье эксперименте приводятся результаты комплексного исследования среднеширотных ионосферных эффектов магнитной бури с использованием данных измерения ПЭС ионосферы и параметров ОНЧ сигналов от радиостанций, расположенных в различных районах Земли.

Постановка эксперимента

Целью эксперимента являлось исследование появления и динамики вызванных магнитной бурей ионосферных возмущений над Европой и их связи с вариациями других геофизических параметров. Для получения данных о перемещении ионосферных неоднородностей в горизонтальном и вертикальном направлениях были исследованы возмущения концентрации ионосферной плазмы в слоях D, E и F ионосферы в диапазоне широт от 40 до 70 градусов северной широты и от 0 до 40 градусов восточной долготы.

Для проведения исследований F-слоя ионосферы использовались данные регистрации ПЭС ионосферы по избранным трассам на спутники навигационной системы GPS с использованием двухчастотного приёмника Javad Sigma, установленного в ГФО «Михнево», с привлечением данных европейских приемников системы GPS мировой сети навигационных приемников SOPAC, расположенных максимально близко к трассам распространения СДВ сигналов. Так как нас интересовали данные об ионосферных изменениях в заданных точках пространства, регистрировались данные, полученные от выбранных спутников, эфемериды которых были заранее известны. В этом случае ПЭС ионосферы представляет собой интегрированные вдоль луча спутник – приемник значения электронных концентраций. Так как основной вклад в значение ПЭС дает F-слой, полученные данные позволяют судить о пространственно-временной изменчивости плотности плазмы в диапазоне высот 250–350 км.

Данные по ионосферным изменениям в нижних слоях ионосферы были получены путем регистрации уровня радиосигналов ОНЧ диапазона от СДВ радиостанций, расположенных в различных районах Земли. Возможность получения данных по возмущению D-слоя ионосферы этим методом обусловлена особенностями распространения электромагнитного излучения ОНЧ диапазона. Радиосигналы в диапазоне частот ниже 30 кГц распространяются в волноводе Земля – ионосфера на расстояния в тысячи км с малым затуханием. При волноводном распространении основное влияние на амплитудно-фазовые характеристики ОНЧ сигналов оказывают стенки волновода, главным образом, D-слой ионосферы. По этой причине изменения амплитуды и фазы сигналов от СДВ станций можно трактовать как возмущение D-слоя ионосферы на трассе распространения. Передающие станции

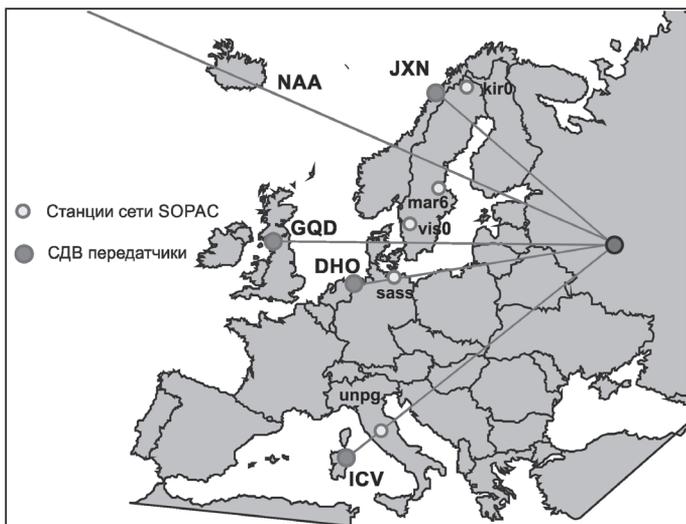


Рис. 6. Расположение СДВ передатчиков и станций сети SOPAC, данные которых использовались при проведении эксперимента

выбирались таким образом, чтобы трассы радиосигналов проходили под различными азимутами над территорией Европы: от северных до южных границ (рис. 6). Список СДВ радиостанций, сигналы которых устойчиво принимаются в геофизической обсерватории «Михнево», приведен в Таблице. В качестве антенн использовались магнитометры MFS-07 фирмы «Metronix». Оси антенн располагались в направлениях магнитный Север-Юг (X-компонента) и магнитный Восток-Запад (Y-компонента).

Таблица

Код станции	Частота, Гц	Широта	Долгота	Азимут от ГФО «Михнево»	Примечание
VTX	16300, 17000	08.387	77.753	130.0	Юг Индии
JXN	16400	66.9743	13.8736	325.9	Север Норвегии
HWU	18300, 21750	46.713	1.245	265.4	Центр Франции
GBZ	19580	54.912	-3.278	286.9	Великобритания
NWC	19800	-21.816	114.166	113.3	Северо-Запад Австралии
ICV	20270	40.923	9.731	244.5	Италия, Сардиния
FTA	20900	48.545	2.579	268.1	Франция
GQD	22100	54.732	-2.883	286.3	Великобритания
DHO	23400	53.074	7.614	276.4	Германия
NAA	24000	44.645	-67.282	308.9	северо-восток США
NPM	21400	21.420	-158.151	15.1	США, Перл-Харбор
TBB	26700	37.418	27.323	206.4	юго-запад Турции

Результаты измерений

Измерения вариаций геомагнитного поля 17 марта по данным магнитометра ГФО «Михнево» показали, что горизонтальные компоненты поля менялись в течение суток на 500–800 нТл, а величина рассчитанного по этим данным эквивалентного тока в ионосфере менялась на три порядка (рис. 7). Такие значительные изменения ионосферного тока и электрического поля должны быть связаны со значительной перестройкой структуры среднеширотной ионосферы.

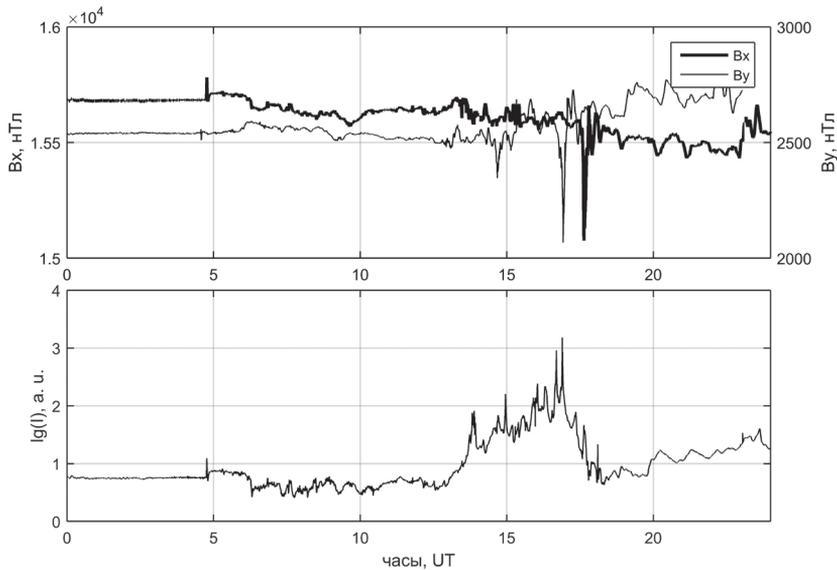


Рис. 7. Изменение геомагнитного поля 17.03.2015 по данным магнитометра ГФО «Михнево» (верхняя панель) и рассчитанного по этим данным эквивалентного тока в ионосфере (нижняя панель)

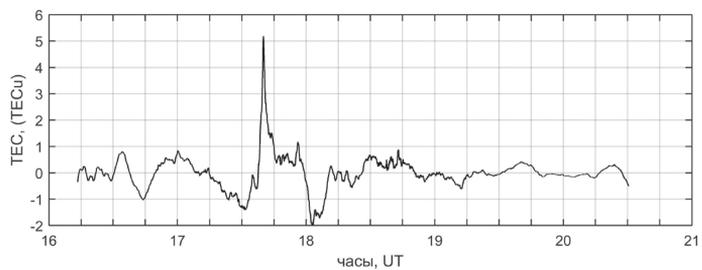
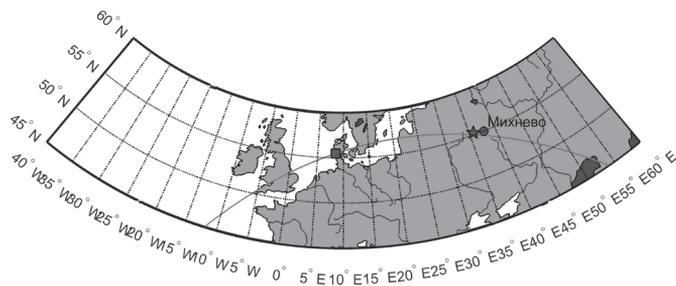


Рис. 8. Изменение полного электронного содержания ионосферы на трассе «Михнево»–спутник GPS Prn12. На нижней панели показана траектория спутника с 16 до 20 UT



На рис. 8 показано изменение полного электронного содержания ионосферы на трассе «Михнево» – спутник GPS Prn12. Скачок плотности произошел в 17:40 UT. Географически место, к которому относится данное измерение, определяется положением подионосферной точки – местом пересечения лучом приемник в «Михнево» – спутник GPS F-слоя ионосферы. В данном случае оно находилось на 100 км западнее ГФО «Михнево». Для анализа динамики перемещения, возникшего в результате магнитной бури ионосферного возмущения, были проанализированы данные по изменению фазы СДВ сигналов и ПЭС ионосферы в период времени с 12 до 20 UT в различных районах Европы.

Верхний график на каждой панели рисунков 9–11 показывает изменения фазы на трассах «Михнево»–передатчик СДВ, код которого указан над графиком, а ниж-

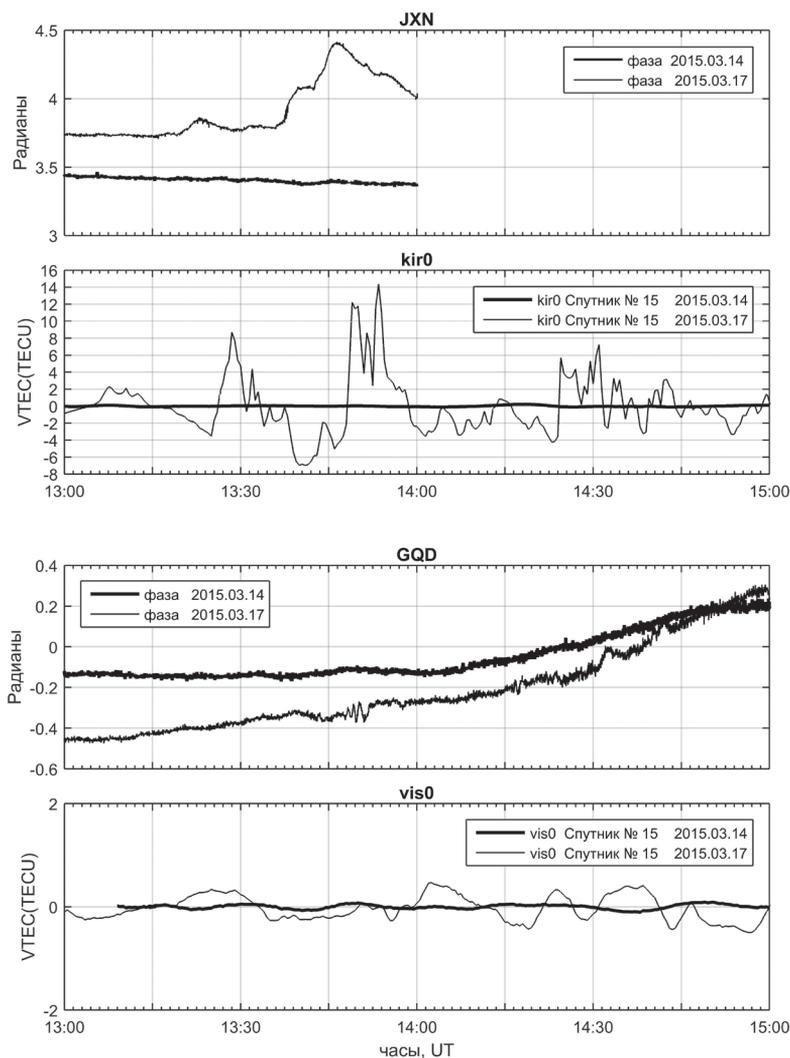


Рис. 9. Возмущения фазы СДВ сигналов на трассе «Михнево»–передатчик JXN и ПЭС ионосферы в обсерватории tro1 (верхняя панель) и на трассе «Михнево»–передатчик GOD и ПЭС для обсерватории vis0 с 13 до 15 UT 17.03.2015

ний график – изменение вертикального ПЭС ионосферы для европейских станций, расположенных вблизи соответствующих СДВ трасс. На всех рисунках для сравнения приведены данные (жирные кривые) по тем же приемникам и трассам для спокойного дня 14 марта 2015 г.

На верхней панели рис. 9 показано практически синхронно возникшие возмущения фазы СДВ сигнала на трассе «Михнево»–передатчик JXN и ПЭС ионосферы в обсерватории tro1 с 13:30 до 14:00 UT. На нижней панели для того же интервала времени показано изменение фазы ОНЧ сигнала на трассе «Михнево»–передатчик GOD и ПЭС для обсерватории vis0. Очевидно, что на этих пунктах возмущение СДВ трасс и ионосферы не наблюдалось. Так как верхняя панель относится к широте примерно 69° , а нижняя к широте 57° , можно предпо-

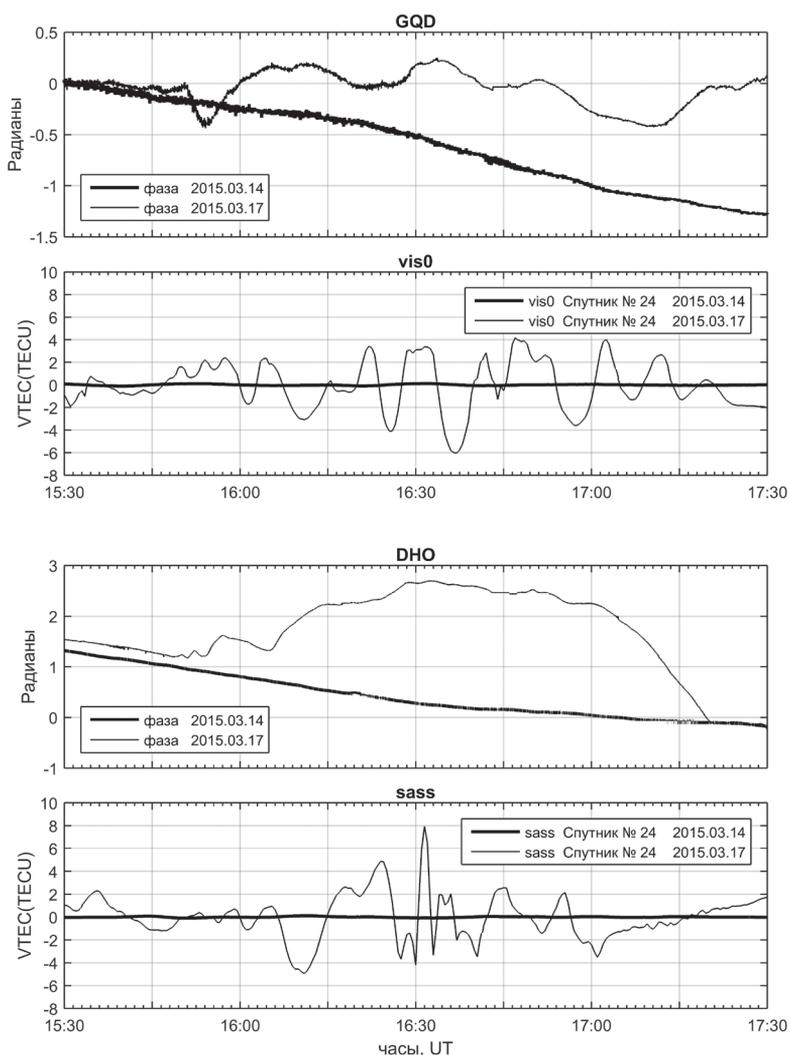


Рис. 10. Возмущения фазы СДВ сигналов на трассе «Михнево»–передатчик GOD и ПЭС ионосферы в обсерватории vis0 (верхняя панель) и на трассе «Михнево»–передатчик DHO и ПЭС для обсерватории sass с 15:30 до 17:30 UT 17.03.2015

лагать, что граница возмущения в это время находилась между указанными широтами.

На верхней панели рис. 10 показано возмущение фазы СДВ сигнала на трассе «Михнево»–передатчик GOD и ПЭС ионосферы в обсерватории vis0 в момент времени 15:45 UT. На нижней панели для того же момента времени показано изменение фазы ОНЧ сигнала на трассе «Михнево»–передатчик ДНО и ПЭС для обсерватории sass. Возмущение ионосферы наблюдается на всех графиках. Верхняя панель

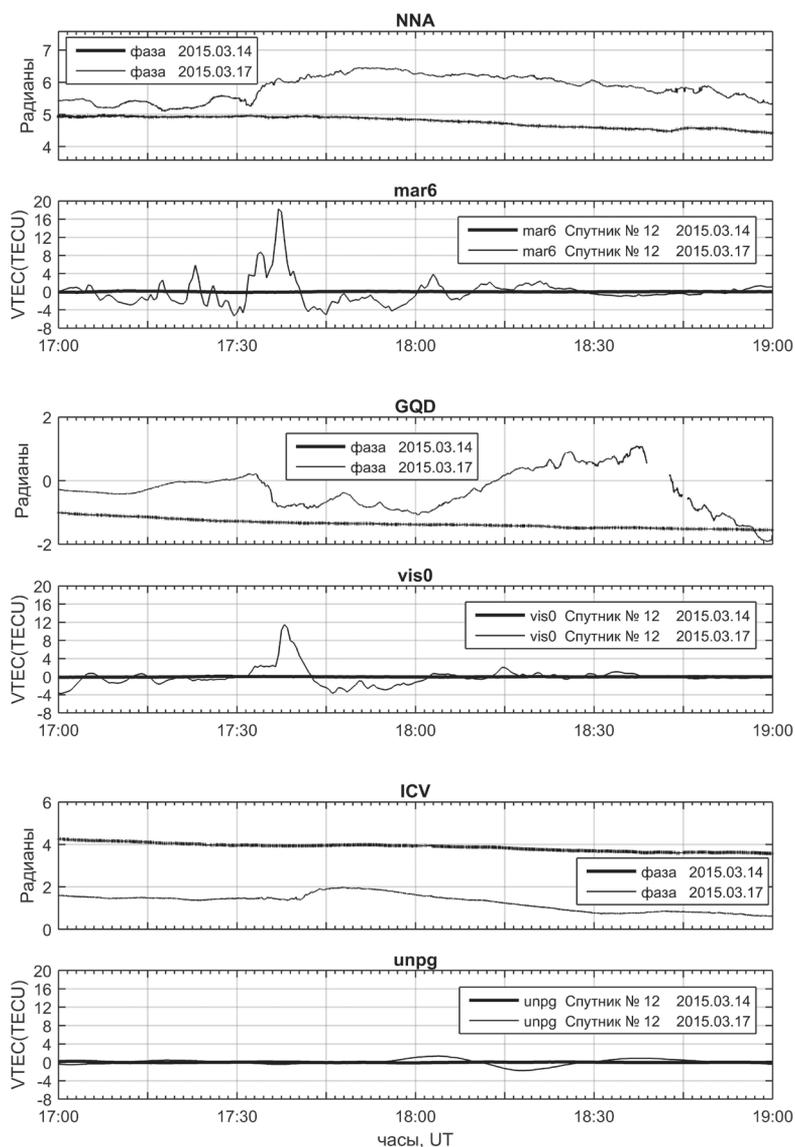


Рис. 11. Возмущения фазы СДВ сигналов на трассе «Михнево»–передатчик NNA и ПЭС ионосферы в обсерватории mar6 (верхняя панель), на трассе «Михнево»–передатчик GOD и ПЭС для обсерватории vis0 (средняя панель) и на трассе «Михнево»–передатчик ICV и ПЭС для обсерватории unpg (нижняя панель) с 17 до 19 UT 17.03.2015

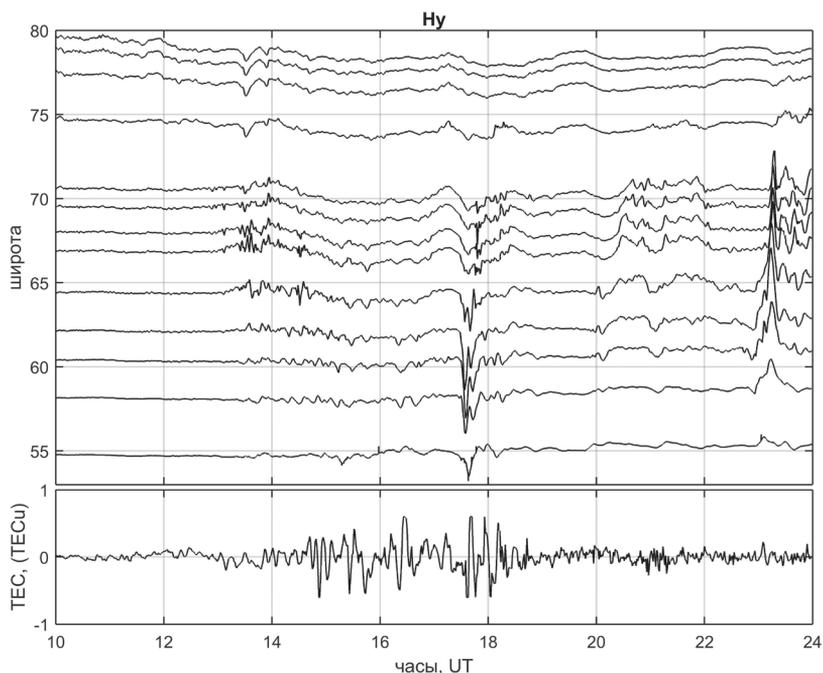


Рис. 12. Объединенный график вариаций Y-компоненты геомагнитного поля на скандинавской сети магнитометров IMAGE в диапазоне широт 57–80° с.ш. и магнитометра в ГФО «Михнево» на 55° с.ш. (верхняя панель) и вариации вертикального ПЭС ионосферы по данным GPS приемника в ГФО «Михнево» (нижняя панель) с 10 до 24 UT 17.03.2015

относится к широте примерно 57°, а нижняя к широте 53–54°. Очевидно, что ионосферное возмущение захватывало оба района.

На рис. 11 для момента времени 17:30 UT показаны результаты измерения фаз СДВ сигналов и ПЭС ионосферы для трех районов, находящихся на широтах 62°, 57° и 43–44° с.ш. Две верхних широты находятся в зоне возмущения, а на третьей, если возмущение ионосферы и наблюдается, оно имеет существенно меньшую величину.

Как показали измерения на европейской высокоширотной сети магнитометров IMAGE [Jusola et al., 2015], вызванные магнитосферной бурей геомагнитные возмущения наблюдались в диапазоне широт от 57 до 80 градусов северной широты (рис. 12). По мере движения на юг их амплитуда уменьшалась, а время появления (по крайней мере для возмущения, начавшегося в 13:30 UT) увеличивалось. Нижняя кривая на верхней панели для широты 55° с.ш. показывает вариации Y компоненты магнитного поля в «Михнево», а нижняя панель – изменение вертикального ПЭС для GPS приемника в ГФО «Михнево». Очевидно, что в период времени с 11 до 22 UT наблюдается связь этих параметров.

Обсуждение результатов

Данные по изменению фаз СДВ радиосигналов и вариаций полного электронного содержания ионосферы, позволяют составить качественное представление о перемещении ионосферных неоднородностей, вызвавших эти изменения.

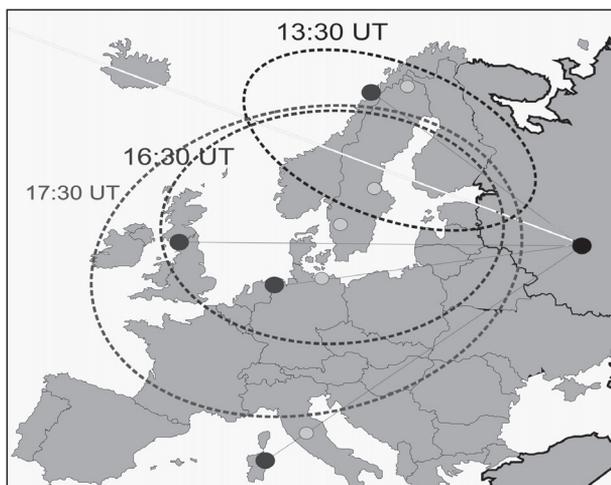


Рис. 13. Динамика возмущенной ионосферы по данным рисунков 9–11 17.03.2015

На рис. 13 показаны положения области возмущенной ионосферы, при построении которых использованы данные, показанные на рисунках 9–11. Границы областей определены по наличию или отсутствию возмущений ионосферы на данных широтах для выбранного момента времени. На рис. 14 представлены суточные изменения минимально наблюдаемой частоты f_{\min} для ионозондов Тромсе (69,7 с.ш., 19,0 в.д.), Юлисрух (54,6 с.ш., 13,4 в.д.), Хилтон (51,6 с.ш., 1,33 в.д.) и Москва (55,5 с.ш., 37,3 в.д.). Рост f_{\min} соответствует увеличению поглощения в D-слое ионосферы (росту электронной концентрации или концентрации нейтралов). Всплески f_{\min} в Тромсе, вероятнее всего, вызваны жесткими энергичными высыпаниями. Сильное возмущение наблюдается по московской станции после 17 UT, а вот в западно-европейском секторе картина различается для Англии (передатчик GQD) и Германии как качественно, так и количественно (возмущения над Англией больше, достигая 3 МГц). При этом амплитудная регистрация станции NRK (37,5 кГц, 63,85 с.ш., 33,25 з.д.), представленная на рис. 15 показывает, что нормальный суточный ход, наблюдавшийся 16.03.2015 сменился колебательным режимом и оставался таким, по крайней мере, на протяжении двух суток. Полученные в ГФО «Михнево» экспериментальные результаты показывают, что область возмущения ионосферы во время бури 17 марта 2015 года охватывает высоты от D- до F-слоя ионосферы.

Координированный (спутники, трассы СДВ, ПЭС на трассе, ионосферное зондирование) анализ показывает более сложную пространственно-временную динамику отклика среднеширотной ионосферы на магнитную бурю, чем можно получить в рамках классического (сети магнитометров и ионозондов, или карты интегрального полного электронного содержания) анализа. Вопрос о физическом механизме ионосферных возмущений целесообразно рассматривать с привлечением спутниковых данных по электронным и протонным высыпаниям, получаемым в настоящее время на спутниках DMSP F16-F19. Если в зоне возмущений фаз и амплитуд СДВ сигналов регистрируются жесткие высыпания с энергией, достаточной для дополнительной ионизации D-слоя, то главной причиной сильных среднеширотных ионосферных эффектов являются возмущения в магнитосферно-ионосферной подсистеме. Отсутствие жестких высыпаний будет свидетельствовать в пользу атмосферно-ионосферного механизма развития бури.

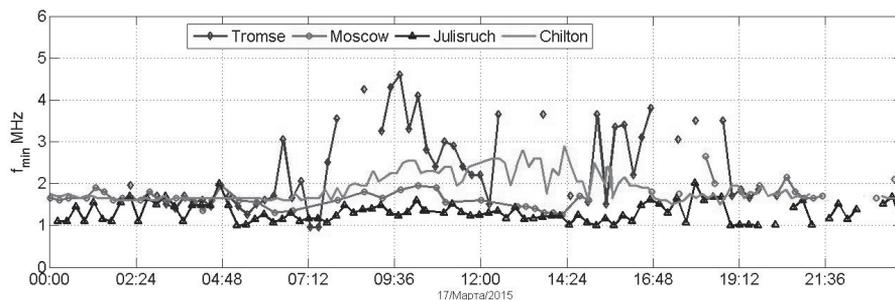


Рис. 14

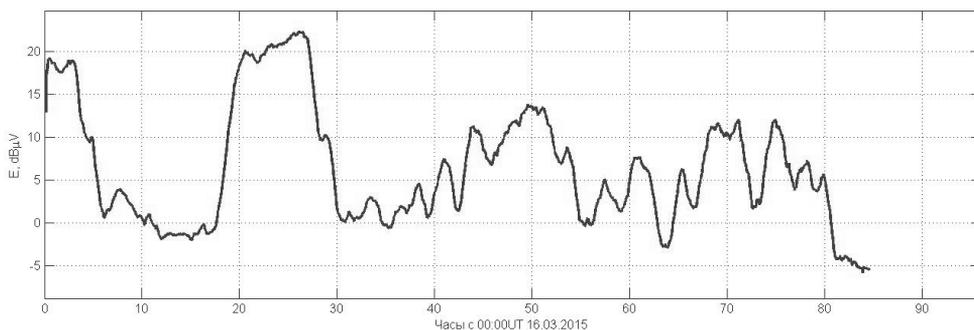


Рис. 15

Тогда механизм сильного возмущения нейтральной атмосферы на высотах 70–300 км обусловлен омической диссипацией интенсивных токовых систем.

Дальнейшее развитие данного подхода в методическом плане позволит уточнить физические механизмы передачи возмущений в средние широты, что должно обеспечить возможность их учета при разработке прогностических моделей ионосферы, качество которых в настоящее время нельзя считать удовлетворительным, несмотря на формальный учет, как считается, всех физических механизмов. Результаты обработки ионосферных эффектов бури 17 марта 2015 года с использованием такого подхода будут представлены в отдельной статье.

Авторы искренне благодарны Ю.И. Зецеру и А.Н. Ляхову за ценные замечания и полезное обсуждение материалов статьи.

Литература

Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И. и др. Исследования ионосферных возмущений методами GPS-радиозондирования в ИСЗФ СО РАН // Солнечно-земная физика, 2011, Вып. 18. С. 24–39.

Han, F., S.A. Cummer, J. Li, and G. Lu, Daytime ionospheric D region sharpness derived from VLF radio atmospherics // J. Geophys. Res., 116, A05314, doi:10.1029/2010JA016299, 2011.

Juusola, L., A. Viljanen, M. van de Kamp, E.I. Tanskanen, H. Vanhamäki, N. Partamies and K. Kauristie, High-Latitude Ionospheric Equivalent Currents During Strong Space Storms: Regional Perspective // *Space Weather*, 13, doi:10.1002/2014SW001139, 2015.

Kamide, Y. and K. Kusano (2015), No Major Solar Flares but the Largest Geomagnetic Storm in the Present Solar Cycle // *Space Weather*, doi:10.1002/2015SW001213.

Maurya, A.K., Veenadhari B., R. Singh, S. Kumar, M.B. Cohen, R. Selvakumaran, S. Gokani, P. Pant, A.K. Singh, and U.S. Inan (2012). Nighttime D region electron density measurements from ELF-VLF tweek radio atmospherics recorded at low latitudes // *J. Geophys. Res.*, 117, A11308, doi:10.1029/2012JA017876.