# Исследование ионосферного отклика на сильную геомагнитную бурю в марте 2015 года по данным евразийской цепи ионозондов

Б.Г. Шпынев<sup>1</sup>, Н.А. Золотухина<sup>1</sup>, Н.М. Полех<sup>1</sup>, М.А. Черниговская<sup>1</sup>, К.Г. Ратовский<sup>1</sup>, А.Ю. Белинская<sup>2</sup>, А.Е. Степанов<sup>3</sup>, В.В. Бычков<sup>4</sup>, С.А. Григорьева<sup>5</sup>, В.А. Панченко<sup>6</sup>, Н.А. Коренькова<sup>7</sup>, Й. Мелич<sup>8</sup>

> <sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия E-mail: shpynev@iszf.irk.ru

<sup>2</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия <sup>3</sup> Институт космофизических исследований и аэрономии СО РАН, Якутск, Россия <sup>4</sup> Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН Паратунка, Россия <sup>5</sup> Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия <sup>6</sup> Институт земного магнетизма и распространения радиоволн РАН, Москва, Россия <sup>7</sup> ЗО Института земного магнетизма и распространения радиоволн РАН Калининград, Россия

<sup>8</sup> Институт атмосферной физики им. Лейбница, Кюлунгсборн, Германия

Выполнено исследование ионосферного отклика на сильную геомагнитную бурю, начавшуюся 17 марта 2015 г., основанное на данных евразийской цепи из восьми высоко- и среднеширотных ионозондов. Для анализа вариаций геомагнитного поля использовались данные глобальной сети магнитометров INTERMAGNET. Выявлены особенности вариаций геомагнитного поля на разных долготах северного полушария. На основе анализа данных ионозондов исследованы долготно-временные вариации параметров высоко- и среднеширотной ионосферы над Евразийским континентом во время бури. В вечерние и ночные часы местного времени на всех станциях были получены ионограммы, типичные для авроральной ионосферы, на некоторых — полное поглощение радиосигнала. Также был зафиксирован эффект перемещения главного ионосферного провала ниже 50° с.ш. Все ионозонды регистрировали нерегулярные структуры в ионосфере, такие как спорадические слои и перемещающиеся ионосферные возмущения. Установлено существование сильной долготной неоднородности в ионосферном отклике на распространение возмущения из высоких в низкие широты. Предполагается, что ионосферный отклик на сильную геомагнитную бурю связан с возмущениями в нижней термосфере вследствие усиления авроральной электроструи, приводящего к росту скорости нейтрального ветра и турбулентности. Это, в свою очередь, вызывает подъем молекулярного газа и уменьшает электронную концентрацию в верхней ионосфере. Данные спутниковых измерений с помощью УФ-спектрометра GUVI TIMED на высотах нижней термосферы (~100 км) подтвердили образование области пониженного отношения [O]/[N,], которая перемещалась на запад в течение нескольких дней.

**Ключевые слова:** наземное радиозондирование ионосферы, ионосферные возмущения, геомагнитная буря, вариации геомагнитного поля

Одобрена к печати: 25.05.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-235-248

# Введение

Изучение воздействия геомагнитных бурь на верхние слои атмосферы Земли является важной частью исследования так называемой космической погоды. Геомагнитные бури вызывают целый комплекс эффектов в ионосфере (ионосферные бури), существенно изменяя ее параметры и, как следствие, условия распространения радиоволн. Современное понимание процессов ионосферных бурь базируется на основе накопленных более чем за восемьдесят лет данных наземных измерений, а также на относительно новых методах спутниковых измерений атмосферных и ионосферных параметров. Эффекты геомагнитных бурь в ионосфере, зарегистрированные по данным наземных наблюдений, подробно классифицированы в обзоре (Buonsanto, 1999). В нем обсуждается роль различных факторов: распространение в ионосфере эффектов бурь по широте и долготе, проникновение электрических полей из высоких широт в низкие, усиление направленного к экватору термосферного ветра, а также «сумеречное» повышение электронной плотности в средних широтах (см. также Тащилин, Романова, 2011; Buonsanto, 1995; Foster, 1993; Hocke, Schlegel, 1996). По данным мировой сети станций некогерентного рассеяния проведено комплексное исследование с целью выявления глобальных эффектов бурь в ионосфере (Goncharenko et al., 2005). Развитие технологий использования GPS-приемников для целей ионосферных исследований значительно увеличило возможности глобального изучения эффектов геомагнитных бурь в ионосфере. Использование данных приемников GPS/ГЛОНАСС мировой сети IGS вместе с совершенствованием моделей глобальной атмосферной циркуляции обеспечивают возможность предсказывать эффекты воздействия сильных геомагнитных возмущений на состояние ионосферы (Afraimovich, Palamartchouk, Perevalova, 1998; Fuller-Rowell et al., 1994; Laštovička, 2002; Lu et al., 1998). Модели и экспериментальные наблюдения дополняют друг друга и улучшают понимание природы ионосферных эффектов геомагнитных бурь.

Цель данной работы заключалась в исследовании реакции ионосферы на сильную геомагнитную бурю в марте 2015 г. по данным координированных наземных измерений высоко- и среднеширотной цепи ионозондов, охватывающей практически весь Евразийский континент. Цепь ионозондов дает возможность исследования крупномасштабных ионосферных структур с более высоким пространственным и временным разрешением по сравнению со спутниковыми измерениями. Следует отметить, что эксперименты с использованием данных подобной сети ионозондов, покрывающей весь Евразийский континент, не имеет аналогов и позволяет получать уникальные результаты. Первоначально данные этой цепи ионозондов были использованы для изучения реакции ионосферы на динамические процессы в стратосфере зимой во время внезапных стратосферных потеплений (Шпынев и др., 2016; Shpynev et al., 2015а, б).

# Данные измерений и калибровка ионосферных параметров

В работе выполнен совместный анализ данных евразийской цепи ионозондов, расположенных в диапазоне широт 50–60° с.ш. с интервалом 15–20° по долготе в долготном секторе 13–158° в.д. (*табл. 1, рис. 1*); данные глобальной сети магнитометров INTERMAGNET (*табл. 2, рис. 1*); данные спутниковых измерений отношения  $[O]/[N_2]$  с помощью УФ-спектрометра GUVI TIMED.

Расположение ионозонда	Географические координаты	Тип ионозонда
Юлиусру	55° с.ш., 13° в.д.	DPS-4
Калининград	55° с.ш., 21° в.д.	Парус 4.0

Таблица 1. Евразийская цепь ионозондов

Москва	56° с.ш., 37° в.д.	DPS-4
Екатеринбург	57° с.ш., 60° в.д.	Парус 3.0
Новосибирск	55° с.ш., 83° в.д.	Парус 1.0
Иркутск	52° с.ш., 104° в.д.	DPS-4
Якутск	62° с.ш., 130° в.д.	DPS-4
Паратунка	53° с.ш., 158° в.д.	Парус 2.0



Рис. 1. Схема расположения ионозондов (серые точки), среднеширотных (голубые точки) и высокоширотных (красные точки) магнитометров

Таблица 2. Магнитометры сети	INTERMAGNET для с	северного полушария
------------------------------	-------------------	---------------------

Станция	IAGA коды	Географические координаты			
		Широта	Долгота		
Высокие широты ~70° с.ш.					
1. Абиско	ABK	68,4	18,8		
2. Соданкюля	SOD	67,4	26,6		
3. Амдерма	AMD	69,5	61,4		
4. Диксон	DIK	73,5	80,6		
5. Норильск	NOK	69,4	88,1		
6. Бухта Тикси	TIK	71,6	129,0		
7. Певек	PBK	70,1	170,9		
8. Барроу	BRW	71,3	203,4		
9. Дедхорс	DED	70,4	211,2		
10. Кембридж-Бэй	СВВ	69,1	255,0		
11. Резолют-Бэй	RES	74,7	265,1		
12. Кекертарсуак	GDH	69,3	306,5		

Таблица 2. Продолжение

Станция	IAGA коды	Географические координаты			
		Широта	Долгота		
Средние широты ~55° с.ш.					
1. Хейл	HLP	54,6	18,8		
2. Борок	BOX	58,1	38,2		
3. Арти	ARS	59,4	58,6		
4. Новосибирск	NVS	54,8	83,2		
5. Иркутск	IRT	52,2	104,5		
6. Якутск	YAK	62,0	129,7		
7. Паратунка	PET	53,0	158,2		
8. Остров Шумагина	SHU	55,4	199,6		
9. Ситка	SIT	57,1	224,7		
10. Форт Черчилль	FCC	58,8	265,9		
11. Валентия	VAL	51,9	349,8		
12. Эскдалемур	ESK	55,3	356,8		

Евразийскую цепь составили четыре российских ионозонда типа «Парус» различных модификаций (Krasheninnikov et al., 2010) и четыре цифровых ионозонда DPS-4 (Reinisch et al., 1997). Названия станций, координаты и типы ионозондов приведены в табл. 1. Поскольку ионозонды отличались по типу, времени изготовления и используемому программному обеспечению, была разработана специальная методика калибровки, позволяющая получать однородные ряды данных с учетом измерений, полученных ионозондами в предшествующие периоды времени. Для каждого ионозонда по данным f<sub>o</sub>F2 и h<sub>m</sub>F2 (с временным разрешением 1 ч) за период 15.02–15.03.2015 усреднением скользящим средним по 14 дням были рассчитаны среднемесячные суточные вариации f<sub>0</sub>F<sub>2</sub> и h<sub>m</sub>F<sub>2</sub> (рис. 2). Этот временной период был относительно магнитоспокойным, а ионосфера слабо возмущенной. Поэтому в дальнейшем будем называть полученные среднемесячные суточные вариации f<sub>o</sub>F2 и h<sub>m</sub>F2 фоновыми. Такое усреднение позволило исключить из данных короткопериодные вариации типа внутренних гравитационных волн, суточный и полусуточный приливы и межсуточные вариации вследствие сизигийного прилива (~14 сут). Однако в случае такой фильтрации усредненные суточные вариации отражают как фактические климатические особенности ионосферной изменчивости, так и систематические погрешности, которые имеются в алгоритмах обработки и программном обеспечении.

Четыре идентичных ионозонда DPS-4 были использованы для определения долготных фоновых вариаций параметров ионосферы, которые рассчитывались по среднемесячным суточным вариациям как линейная интерполяция между этими четырьмя пунктами. Для ионозондов типа «Парус» рассчитывались отклонения исходных данных f<sub>o</sub>F2 и h<sub>m</sub>F2 от их среднемесячных суточных значений. Затем к этим отклонениям прибавлялись фоновые среднемесячные значения, полученные из данных DPS-4, которые были интерполированы в соответствие с долготой ионозонда «Парус». Откалиброванные таким образом экспериментальные данные цепи ионозондов, свободные от систематических ошибок каждого инструмента, можно было использовать для сравнительного анализа ионосферной изменчивости.



Рис. 2. Пример сравнения фоновых вариаций критических частот f<sub>o</sub>F2 для разных ионозондов цепи в невозмущенных условиях 28.02 и 01.03.2015 г.

Пропуски во временных рядах данных измерений ионозондов заменялись линейной интерполяцией между ближайшими имеющимися в наличии измерениями.

Для исследования геомагнитных эффектов в ионосфере использовались не только регулярные ионосферные данные, такие как критические частоты f<sub>o</sub>F2 и высоты максимума электронной концентрации h<sub>m</sub>F2, но некоторые дополнительные параметры и даже «необычные» ионограммы. Для определения времени прохождения главного ионосферного провала (ГИП) через местоположение ионозонда был проведен специальный анализ ионограмм, в котором фиксировалось время регистрации ионограмм аврорального типа. На основе расширенного набора экспериментальных данных проанализированы особенности долготной структуры и динамики ионосферы в течение геомагнитной бури марта 2015 г., а также рассмотрен механизм, ответственный за формирование этих особенностей.

# Магнитная буря 17-19 марта 2015 г. и методика анализа геомагнитных параметров

Геомагнитная обстановка в первой половине марта 2015 г. была относительно спокойной, как видно на рис. 3. В 04:45 UT 17 марта 2015 г. началась большая магнитная буря класса G4. Внезапное начало бури (SSC — Storm Sudden Commencement) отмечено на рис. 4 соответственно обозначенной вертикальной линей. В начальную фазу бури (04:45-06:22 UT) планетарный геомагнитный индекс *Кр* резко увеличился от 2 до 5 (*puc. 4*). Авроральная активность (индекс AE) почти не изменилась. Постепенное усиление авроральной активности началось после 06:00 UT, т.е. за ~20 мин до начала главной фазы бури, которая продолжалась ~16,5 ч с 06:23 до 22:47 UT 17 марта 2015 г. и была двухступенчатой (моменты начала ступеней отмечены вертикальными линиями M1 и M2 на *рис. 4*). В максимуме бури (22:00-23:00 UT 17.03.2015 г.) Dst-индекс понизился до минимума, составляющего -223 нТл (*puc. 3 и 4*). На протяжении главной фазы и ранней фазы восстановления (начало фазы отмечено линией R1 на *рис. 4*) *Кр*-индекс немонотонно менялся от 5+ до 8-; АЕ от 65 до 2300 нТл. После 00:17 UT 18.03.2015 г. (начало поздней восстановительной фазы бури отмечено линией R2 на *рис. 4*) авроральная активность ослабла. Значения AE-индекса в последующие восемь часов были ниже 400 нТл. Закончилась буря 25 марта 2015 г. после 12:00 UT. По информации, размещенной на сайте www.solen.info/solar/old reports/ и основанной на данных спутника SOHO, буря развивалась в результате взаимодействия магнитосферы Земли с высокоскоростными потоками солнечного ветра из четырех корональных дыр и выбросом корональной массы, сопровождавшим относительно слабую рентгеновскую вспышку класса С9.1, зарегистрированную в 01:15-02:13 UT 15 марта 2015 г. Более детальная информация о гелиосферных и магнитосферных возмущениях во время этой бури дана в статьях (Полех и др., 2016; Wu et al., 2016).



Рис. 3. Временные вариации Dst-индекса по данным мирового центра данных по геомагнетизму в Киото, Япония (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/

Для анализа вариаций геомагнитного поля использовались данные глобальной сети магнитометров INTERMAGNET, а также оригинальные данные станции Норильск, принадлежащие ИСЗФ (Институт солнечно-земной физики), и данные высокоширотных станций PBK, TIK, DIK и AMD, принадлежащие ААНИИ (Арктический и антарктический научно-исследовательский институт). Пункты геомагнитных наблюдений были разбиты на две группы: высокоширотные — вдоль ~70° с. ш. и среднеширотные — вдоль ~55° с. ш. (*рис. 1*), приблизительно совпадающей с расположением цепи ионозондов. Координаты и международные IAGA коды станций указаны в *табл. 2*.



Рис. 4. Временные вариации Dst и SYM-H- (верхняя панель), AE- (средняя панель) и Кр-(нижняя панель) индексов 17–19 марта 2015 г. Вертикальные пунктирные линии отмечают: SSC внезапное начало бури; M1 и M2 — начало двух ступеней главной фазы бури; R1 — начало ранней восстановительной и R2 — поздней восстановительной фаз бури. Стрелка соответствует первому минимуму индексов Dst и SYM-H

Для анализа вариаций геомагнитного поля (ГМП) по данным каждой станции (*табл. 2*) были рассчитаны для каждого часа стандартные отклонения значений *H*-и *Z*-компонент ГМП (*var<sub>H</sub>* и *var<sub>z</sub>* соответственно) от соответствующих фоновых значений. Фоновые значения компонент ГМП определялись по данным, полученным в течение магнитоспокойного дня 13.03.2015 г. На *puc. 5* представлены долготно-временные распределения *var<sub>H</sub>* и *var<sub>z</sub>* в высоких и средних широтах для 15–21 марта 2015 г. Видно, что распределение компонент амплитуды возмущений ГМП проявляет четкую долготную зависимость: в высоких широтах видны два максимума, расположенные вблизи ~60–80° и ~200–220° в.д. (*puc. 5a*); в средних — три максимума, находящиеся вблизи ~30–40°, ~130–140° и ~270° в.д. (*puc. 5б*). Высокоширотный минимум *var<sub>H</sub>* и *var<sub>z</sub>* на ~130–140° в.д. совпадает по долготе с максимумом соответствующих переменных в средних широтах, а высокоширотный максимум *var<sub>H</sub>* и *var<sub>z</sub>* на долготах ~80–90° — с минимумом *var<sub>H</sub>* и *var<sub>z</sub>* в средних широтах.



Рис. 5. Долготно-временные вариации отклонений H- и Z-компонент ГМП в высоких (а) и средних (б) широтах для 15–21 марта 2015 г. (время UT)

#### Результаты анализа и обсуждение

На *рис.* 6 в качестве примера приведена карта распределения долготно-временных вариаций критической частоты  $f_0F2$  для периода с 15 по 21 марта 2015 г., построенная на основе данных цепи ионозондов. Аналогичные долготно-временные распределения были получены для высоты максимума ионизации  $h_mF2$ . Дополнительно на основе первичных данных всех ионозондов был проведен анализ ионограмм и выделены интервалы времени, когда станция оказывалась внутри ГИП, положение которого во время геомагнитных возмущений является индикатором активности ионосферных возмущений. Эти интервалы времени на всех станциях были зарегистрированы ионограммы, типичные для авроральной ионосферы (Мамруков и др., 2000), на некоторых — полное поглощение радиосигнала. Все ионозонды регистрировали нерегулярные структуры в ионосфере, такие как спорадические слои и перемещающиеся ионосферные неоднородности.

В момент SSC (*puc. 4*), вызванный воздействием межпланетной ударной волны на магнитосферу Земли, американский сектор был расположен в вечернем, а Дальний Восток России — в околополуденном секторе местного времени. Как отмечено в предыдущем разделе, главная фаза бури продолжалась с 06:23 до 22:47 UT 17 марта 2015 г. и носила двухступенчатый характер (начала ступеней отмечены линиями M1 и M2 на *puc. 4* и стрелками на *рис.* 6). В течение первой ступени американский сектор находился на ночной стороне Земли, а географический регион Дальнего Востока перемещался из послеполуденного в предполуночный сектор местного времени. Над Дальним Востоком в вечернем секторе произошло резкое уменьшение  $f_0F2$ , а ГИП переместился на средние широты. Во время второй ступени магнитной бури в ночном секторе находилась Восточная Сибирь. В предполуночном секторе местного времени (~30–110° в.д.) наблюдался ярко выраженный «сумеречный» эффект (dusk effect) — положительное ионосферное возмущение на главной фазе магнитной бури, проявляющееся в резком повышении электронной концентрации в области F2 ионосферы в вечерние часы. После этого ГИП опустился ниже 50° с. ш. над всей территорией Евразии. Такая изменчивость ионосферы является типичной для больших ионосферных возмущений в средних широтах, однако совершенно неожиданные результаты были получены в результате анализа ионосферной динамики по долготе в последующие дни после начала магнитной бури.



Рис. 6. Вариации f F2 по данным евразийской цепи ионозондов (~55°с.ш.) в долготном секторе 13–158° в.д. в период 15–21 марта 2015 г. (время UT)

На *рис. 6* видно, что в долготном секторе ~80–160° в.д. зона основного отрицательного возмущения ионосферы (понижение  $f_0F2$  на 5–7 МГц относительно соответствующего уровня 15–16 марта) наблюдалась в течение двух суток (17 и 18 марта). В отличие от этого, на долготах Европы днем 18 марта  $f_0F2$  была лишь на 2–3 МГц ниже фонового уровня. Однако на поздней восстановительной фазе бури 19 марта, когда на долготах ~80–120° в.д. значения  $f_0F2$  поднялись до невозмущенного уровня, в европейском секторе, наоборот, наблюдалось понижение  $f_0F2$ , которое продолжалось и в последующие дни 20–21 марта. Кроме этого, на долготах ~30–70 и 120–140° в.д. в ночные часы 19 марта наблюдалось перемещение ГИП ниже 55° с.ш. В Западной Европе аналогичное перемещение ГИП наблюдалось также и 20 марта, т.е. на третьи сутки после главной фазы бури. Оценки, сделанные нами по данным ионозондов, показали, что область пониженной электронной концентрации смещалась в западном направлении со скоростью ~50–70 м/с в течение трех суток. По аналогии с этим мы предположили, что область низких значений  $f_0F2$ , которая появилась 21 марта на долготах ~140–160° в.д., связана с перемещением на эти долготы области отрицательного ионосферного возмущения, образовавшейся в американском секторе на первой ступени главной фазы бури.

Из анализа вариаций ионосферных параметров было установлено, что в долготном распределении  $f_0F2$  существовал явный максимум на долготах вблизи ~90° в.д. и два симметрично расположенных минимума на долготах вблизи ~50 и ~130° в.д. Сопоставление особенностей долготно-временных вариаций параметров ионосферы по данным евразийской цепи ионозондов (*puc. 6*) хорошо согласуется с вариациями ГМП на средних широтах (*puc. 56*), описанных в предыдущем разделе. Становится очевидным, что области преимущественного распространения ГИП на средние широты совпадали с долготами максимальных вариаций ГМП в возмущенных условиях. Наоборот, в области минимума вариаций ГМП находился долготный максимум ионизации, наблюдавшийся как в спокойных, так и в возмущенных условиях.

Такой продолжительный во времени и необычный эффект магнитной бури в ионосфере поставил естественный вопрос о физическом механизме наблюдаемого явления. Был рассмотрен очевидный механизм, состоящий в том, что ионосферный отклик на сильную геомагнитную бурю связан с возмущениями в нижней термосфере, вызванными нагревом газа авроральными электроструями. Известно, что этот нагрев вызывает увеличение скорости нейтрального ветра и усиление турбулентности в нижней ионосфере. 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 (Danilov, 2003; Klimenko et al., 2011; Laštovička, 2009; Liou et al., 2005; Prölss, Werner, 2002).

Для подтверждения действия описанного выше механизма влияния геомагнитных возмущений на состояние ионосферы дополнительно были проанализированы данные спутниковых измерений нейтрального состава с помощью УФ-спектрометра GUVI TIMED на высотах нижней термосферы (~100 км). На *puc.* 7 представлены спутниковые данные отношения  $[O]/[N_2]$  (http://guvi.jhuapl.edu/site/data/data\_fetch/13\_on2\_gif), которые подтвердили образование обширной области пониженного отношения  $[O]/[N_2]$ над Дальним Востоком 17 марта 2015 г. В последующие дни эта область перемещалась на запад, достигнув к 20 марта Западной Европы. Другая область пониженного отношения  $[O]/[N_2]$ , которая образовалась 17 марта над американским сектором, переместилась к 20–21 марта 2015 г. на долготы 140–160° в.д. и вновь была зарегистрирована над регионом Дальнего Востока. Эти вариации нейтрального состава термосферы привели к вариациям электронной концентрации ионосферы, зарегистрированной ионозондами.



*Рис. 7. Отношение* [O]/[N<sub>2</sub>] на высотах нижней термосферы по спутниковым измерениям GUVI TIMED для отдельных дней марта 2015 г.

#### Выводы

Выполненное в работе исследование ионосферного отклика на сильную геомагнитную бурю класса G4, начавшуюся 17 марта 2015 г., позволило получить следующие результаты.

1. Метод калибровки, реализованный для комплексного анализа данных различных типов ионозондов, дал возможность изучать крупномасштабную структуру и динамику ионосферы.

2. По данным высоко- и среднеширотной цепочек магнитометров в вариациях ГМП во время бури 17 марта 2015 г. установлена долготная асимметрия. На средних широтах Евразийского континента четко выявлены две зоны повышенного уровня геомагнитных вариаций (центрированные вблизи долгот ~30–40 и ~130–140° в.д.) и зона минимальных вариаций (вблизи долгот ~80–90° в.д.).

3. В среднеширотной ионосфере на долготах максимумов вариаций ГМП сформировались области пониженной электронной концентрации. При этом ГИП смещался на юг в ночное время ниже широты 50° с.ш. В области минимума геомагнитных вариаций наблюдалось быстрое восстановление ионосферы после магнитной бури и образование локального максимума ионизации.

4. Установлено, что во время бури на высотах нижней термосферы возникла область пониженного отношения [O]/[N<sub>2</sub>] над регионом Дальнего Востока, которая перемещалась на запад над территорией Евразии в течение нескольких дней. Эти вариации нейтрального состава термосферы привели к вариациям электронной концентрации на высотах F-области ионосферы, зарегистрированной ионозондами.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-6894.2016.5, а также при частичной поддержке РФФИ (проекты № 15-45-05090 и 15-45-05066). Экспериментальные данные частично получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» (ИСЗФ СО РАН).

# Литература

- Мамруков А.П., Халипов В.Л., Филиппов Л.Д., Степанов А.Е., Зикрач Э.К., Смирнов В.Ф., Шестакова Л.В. 1. Геофизическая информация по наклонным радиоотражениям в высоких широтах и их классификация // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2000. Вып. 111. С. 14-27.
- Полех Н.М., Золотухина Н.А., Романова Е.Б., Пономарчук С.Н., Куркин В.И., Подлесный А.В. Ионосфер-2 ные эффекты магнитосферных и термосферных возмущений 17-19 марта 2015 г. // Геомагнетизм и аэро-
- ные эффекты магнитосферных и термосферных возмущении 17–19 марта 2015 1. // теомагнетизм и аэро-номия. 2016. Т. 56. № 5. С. 591–605. DOI: 10.7868/S0016794016040179. *Тащилин А.В., Романова Е.Б.* Роль магнитосферной конвекции и высыпаний в образовании «сумеречного эффекта» на главной фазе магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. 2011. Т. 51. № 4. С. 474–480. 3
- Шпынев Б.Г., Черниговская М.А., Куркин В.И., Ратовский К.Г., Белинская А.Ю., Степанов А.Е., Быч-4. ков В.В., Григорьева С.А., Панченко В.А., Коренькова Н.А., Лещенко В.С., Мелич Й. Пространственные вариации параметров ионосферы северного полушария над зимними струйными течениями // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 204–215.
- Afraimovich E.L., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P. GPS radio interferometry of travelling ionospheric disturbances // J. Atmos. Terr. Phys. 1998. Vol. 60. P. 1205–1223. 5.
- Buonsanto M.J. A case study of the ionospheric storm dusk effect // J. Geophys. Res. 1995. Vol. 100. No. A12. 6. P. 23 857–23 869. DOI: 10.1029/95JA02697.
- Buonsanto M.J. Ionospheric storms a review // Space Sci. Rev. 1999. Vol. 88. P. 563-601. 7.
- Danilov A.D. Long-term trends of foF2 independent on geomagnetic activity // Ann. Geophys. 2003. Vol. 21. 8. No. 5. P. 1167-1176.
- 9. Foster J.C. Storm time plasma transport at middle and high latitudes // J. Geophys. Res. 1993. Vol. 98. P. 1675-1689.
- 10. Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Moffett R.J., Quegan S. Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99. P. 3893-3914.
- 11. Goncharenko L.P., Salah J.E., van Eyken A., Howells V., Thayer J.P., Taran V.I., Shpynev B., Zhou Q., Chan J. Observations of the April 2002 geomagnetic storm by the global network of incoherent scatter radars // Ann. Geophys. 2005. Vol. 23. No. 1. P. 163–181.
- 12. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // Ann. Geophys. 1996. Vol. 14. P. 917–940.
- 13. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Goncharenko L.P., Fagundes R.R., de Jesus R., de Abreu A.J., *Vesnin A.M.* Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and lowlatitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005 // Radio Sci. 2011. RS0D03. DOI: 10.1029/2010 RS004 590.
- 14. *Krasheninnikov I., Pezzopane M., Scotto C.* Application of Autoscala to ionograms recorded by the AIS-Parus ionosonde // Computers and Geosciences. 2010. Vol. 36. P. 628–635. DOI:10.1016/j.cageo.2009.09.013.
- Laštovička J. Monitoring and forecasting of ionospheric space weather effects of geomagnetic storms // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2002. Vol. 64. P. 697–705. DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00031-7.
   Laštovička J. Forcing of the ionosphere by waves from below // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2006. Vol. 68.
- P. 479-497.
- 17. *Liou K., Newell P.T., Anderson B.J., Zanetti L., Meng C.-I.* Neutral composition effects on ionospheric storms at middle and low latitudes // J. Geophys. Res. 2005. Vol. 110. P. A05309. DOI: 10.1029/2004JA010840.
- 18. Lu G., Pi X., Richmond A.D., Roble R.G. Variations of total electron content during geomagnetic disturbances: a model/observation comparison // Geophys. Res. Lett. 1998. Vol. 25. P. 253-256.
- 19. Prölss G.W., Werner S. Vibrationally excited nitrogen and oxygen and the origin of negative ionospheric storms
- I roiss G.W., Wench S. Violationary excited introgen and oxygen and the origin of negative ionosphere storms // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 107. No. A2. P. 1016. DOI: 10.1029/2001JA900126.
   Reinisch B.W., Haines D.M., Bibl K., Galkin I., Huang X., Kitrosser D.F., Sales G.S., Scali J.L. Ionospheric sounding support of OTH radar // Radio Sci. 1997. Vol. 32. No. 4. P. 1681–1694.
- Shpynev B.G., Kurkin V.I., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Belinskaya A.Yu., Grigorieva S.A., Stepanov A.E., Bychkov V.V., Pancheva D., Mukhtarov P. (2015a) High-midlatitude ionosphere response to major stratospheric warming // Earth, Planets and Space. 2015. Vol. 67. id 18. 10 p. DOI: 10.1186/s40623-015-0187-1.
   Shpynev B.G., Kurkin V.I., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Belinskaya A.Yu., Grigorieva S.A., Stepanov A.E., New York, Stepanov A.E., Chernigovskaya M.A., Belinskaya A.Yu., Grigorieva S.A., Stepanov A.E., New York, Stepanov B.G., Kurkin V.I., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Belinskaya A.Yu., Grigorieva S.A., Stepanov A.E., New York, Stepanov A.E., New York, Stepanov B.G., Kurkin V.I., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Belinskaya A.Yu., Grigorieva S.A., Stepanov A.E., New York, Stepanov York, Stepanov A.E., New Y
- Bychkov V.V., Panchenko V.A., Korenkova N.A., Leschenko V.S. (2015b) Ionosphere Response to Stratospheric Circulation in High-midlatitudes // PIERS Proc. Prague, Czech Republic, July 6–9, 2015. 2015. P. 2534–2538. (b)
- 23. Wu C.C., Liou K., Lepping R.P., Hutting L., Plunkett S., Howard R.A., Socker D. The first super geomagnetic storm of solar cycle 24: "The St. Patrick's day event (17 March 2015)" // Earth, Planets and Space. 2016. Vol. 68. id 151. DOI:10.1186/s40623-016-0525-y.

# Studying the ionosphere response to severe geomagnetic storm in March 2015 according to Eurasian ionosonde chain

B.G. Shpynev<sup>1</sup>, N.A. Zolotukhina<sup>1</sup>, N.M. Polekh<sup>1</sup>, M.A. Chernigovskaya<sup>1</sup>, K.G. Ratovsky<sup>1</sup>, A.Yu. Belinskaya<sup>2</sup>, A.E. Stepanov<sup>3</sup>, V.V. Bychkov<sup>4</sup>, S.A. Grigorieva<sup>5</sup>, V.A. Panchenko<sup>6</sup>, N.A. Korenkova<sup>7</sup>, J. Mielich<sup>8</sup>

> <sup>1</sup>Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia E-mail: shpynev@iszf.irk.ru

<sup>2</sup>A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup> Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia

<sup>4</sup>Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation FEB RAS

Paratunka, Russia

<sup>5</sup> Institute of Geophysics UB RAS, Yekaterinburg, Russia

<sup>6</sup>N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetizm Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS

Moscow, Russia

<sup>7</sup>West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism Ionosphere and Radio wave Propagation RAS, Kaliningrad, Russia

<sup>8</sup>Leibniz Institute for Atmospheric Physics, Kühlungsborn, Germany

We studied the ionosphere response to severe geomagnetic storm in March 2015 on the basis of high midlatitude ionosonde chain of the Eurasian continent. For analysis of the geomagnetic field variations, we used the magnetometers data for the northern hemisphere, particularly from the INTERMAGNET data set. On the basis of the ionosonde chain data, we studied the time/longitude dynamics of the high-middle latitude ionosphere over the Eurasian continent during the geomagnetic storm. Special handle processing was performed during the ionograms analysis, which purpose was to detect the time intervals when the main ionospheric trough crossed the ionosondes positions. The criterion for such displacement of the main ionospheric trough equatorial wall was recording of the auroral type ionogram. During the storm, all stations detected the ionograms typical for the auroral ionosphere. Few observational points were located within the zone where the ionosondes showed full signal absorption. All the ionosondes detected irregular structures of the lower ionosphere, such as specific sporadic layers and travelling ionospheric disturbances. The investigation showed that during the storm, there existed a significant longitudinal inhomogeneity of the ionosphere response to the disturbances propagation from high to low latitudes. We assume that the storm-associated ionosphere dynamics is determined by the lower thermosphere disturbances due to the auroral electrojet amplifications producing the enhanced neutral wind and turbulences; these, in turn, uplift the molecular gas to the ionospheric heights. This process decreases the [O]/[N2] ratio and, consequently, the electron density. We found that after the storm, the disturbed thermosphere region moved westward and existed for more than three days. Such mechanism was confirmed by the ultraviolet imager GUVI TIMED data, where the low [O]/[N2] area moved westward over the analyzed region during and after the geomagnetic storm.

Keywords: ionosonde chain, ionospheric disturbances, geomagnetic storm, geomagnetic field variations

*Accepted: 25.05.2017* DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-235-248

## References

- 1. Mamrukov A.P., Khalipov V.L., Filippov L.D., Stepanov A.E., Zikrach E.K., Smirnov V.F., Shestakova L.V., Geofizicheskaya informatsiya po naklonnym radiootrazheniyam v vysokikh shirotakh i ikh klassifikatsiya (Geophysical information slanted radio reflections at high latitudes and their classification), *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa*, Novosibirsk: SB RAS, 2000, Issue 111, pp. 14–27.
- Polekh N.M., Zolotukhina N.A., Romanova E.B., Ponomarchuk S.N., Kurkin V.I., Podlesnyi A.V., Ionospheric effects of magnetospheric and thermospheric disturbances on March 17–19, 2015, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2016, Vol. 56, No. 5, pp. 557–571. DOI: 10.1134/S0016793216040174.
   Tashchilin A.V., Romanova E.B., Role of magnetospheric convection and precipitation in the formation of the
- 3. Tashchilin A.V., Romanova E.B., Role of magnetospheric convection and precipitation in the formation of the "Dusk Effect" during main phase of a magnetic storm, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2011, Vol. 51, No. 4, pp. 468–474.
- 4. Shpynev B.G., Chernigovskaya M.A., Kurkin V.I., Ratovsky K.G., Belinskaya A.Yu., Stepanov A.E., Bychkov V.V., Grigorieva S.A., Panchenko V.A., Korenkova N.A., Leschenko V.S., Mielich J., Prostranstvennye variatsii parametrov ionosfery severnogo polushariya nad zimnimi struinymi techeniyami (Spatial variations of the ionosphere parameters over the Northern Hemisphere winter jet streams), *Sovremennye problemy distantsionnogo* zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 204–215.
- *zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 204–215.
  Afraimovich E.L., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P., GPS radio interferometry of travelling ionospheric disturbances, J. Atmos. Terr.Phys., 1998, Vol. 60. pp. 1205–1223.

- Buonsanto M.J., A case study of the ionospheric storm dusk effect, J. Geophys. Res., 1995, Vol. 100, No. A12, 6. pp. 23857-23869. DOI: 10.1029/95JA02697.
- 7. Buonsanto M.J., Ionospheric storms — a review, Space Sci. Rev., 1999, Vol. 88, pp. 563-601.
- Danilov A.D., Long-term trends of foF2 independent on geomagnetic activity, Ann. Geophys., 2003, Vol. 21, 8. No. 5, pp. 1167-1176.
- Foster J.C., Storm time plasma transport at middle and high latitudes, J. Geophys. Res., 1993, Vol. 98, pp. 1675– 9. 1689.
- Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Moffett R.J., Quegan S., Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, 1994, Vol. 99, pp. 3893–3914.
   Goncharenko L.P., Salah J.E., van Eyken A., Howells V., Thayer J.P., Taran V.I., Shpynev B., Zhou Q., Chan J.,
- Observations of the April 2002 geomagnetic storm by the global network of incoherent scatter radars, Ann. Geophys., 2005, Vol. 23, No. 1, pp. 163-181.
- 12. Hocke K., Schlegel K., A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982-1995, Ann. Geophys., 1996, Vol. 14, pp. 917–940. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Goncharenko L.P., Fagundes R.R., de Jesus R., de Abreu A.J.,
- 13. Vesnin A.M., Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and lowlatitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005, *Radio Sci.*, 2011, RS0D03. DOI: 10.1029/2010 RS004 590.
- 14. Krasheninnikov I., Pezzopane M., Scotto C., Application of Autoscala to ionograms recorded by the AIS-Parus ionosonde, *Computers & Geoscience*, 2010, Vol. 36, pp. 628–635. DOI: 10.1016/j.cageo.2009.09.013.
- 15. Laštovička J., Monitoring and forecasting of ionospheric space weather effects of geomagnetic storms, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 2002, Vol. 64, pp. 697-705. DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00031-7.
- Laštovička J., Forcing of the ionosphere by waves from below, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 2006, Vol. 68, pp. 479-497.
- Liou K., Newell P.T., Anderson B.J., Zanetti L., Meng C.-I., Neutral composition effects on ionospheric storms at
- middle and low latitudes, *J. Geophys. Res.*, 2005, Vol. 110, pp. A05309. DOI: 10.1029/2004JA010840.
  18. Lu G., Pi X., Richmond0A.D., Roble R.G., Variations of total electron content during geomagnetic disturbances: a model/observation comparison, *Geophys. Res. Lett.*, 1998, Vol. 25, pp. 253–256.

- Prölss G.W., Werner S., Vibrationally excited nitrogen and oxygen and the origin of negative ionospheric storms, *J. Geophys. Res.*, 2002, Vol. 107, No. A2, pp. 1016. DOI: 10.1029/2001JA900126.
   Reinisch B.W., Haines D.M., Bibl K., Galkin I., Huang X., Kitrosser D.F., Sales G.S., Scali J.L., Ionospheric sounding support of OTH radar, *Radio Sci.*, 1997, Vol. 32, No. 4, pp. 1681–1694.
   Shpynev B.G., Kurkin V.I., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Belinskaya A.Yu., Grigorieva S.A., Stepanov A.E., Bychkov V.V., Pancheva D., Mukhtarov P., High-midlatitude ionosphere response to major strategyberic working with *Planets and Space* 2015, Vol. 67, id 18, 10 p. DOI: 10.1186/e/40623.015.0187.1 stratospheric warming, Earth, Planets and Space, 2015, Vol. 67, id 18, 10 p. DOI: 10.1186/s40623-015-0187-1.
- Shpynev B.G., Kurkin V.I., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Belinskaya A.Yu., Grigorieva S.A., Stepanov A.E., Bychkov V.V., Panchenko V.A., Korenkova N.A., Leschenko V.S., Ionosphere Response to 22 Stratospheric Circulation in High-midlatitudes, PIERS Proceedings, Prague, Czech Republic, July 6-9, 2015,
- pp. 2534–2538. Wu C.C., Liou K., Lepping R.P., Hutting L., Plunkett S., Howard R.A., Socker D., The first super geomagnetic storm of solar cycle 24: "The St. Patrick's day event (17 March 2015)", *Earth, Planets and Space*, 2016, Vol. 68, 23. id 151. DOI: 10.1186/s40623-016-0525-y.