

**ДИНАМИКА ОБРАТНОГО РАССЕЙНИЯ  
ВО ВРЕМЯ БОЛЬШОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ  
ПО ДАННЫМ ЕКАТЕРИНБУРГСКОГО РАДАРА: 17–22 МАРТА 2015 Г.**

**BACKSCATTERING DYNAMICS DURING INTENSE GEOMAGNETIC STORM  
AS DEDUCED FROM YEKATERINBURG RADAR DATA: MARCH 17–22, 2015**

**Н.А. Золотухина**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, zolot@iszf.irk.ru*

**В.И. Куркин**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, kurkin@iszf.irk.ru*

**Н.М. Полек**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, polekh@iszf.irk.ru*

**Е.Б. Романова**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, ebr@iszf.irk.ru*

**N.A. Zolotukhina**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, zolot@iszf.irk.ru*

**V.I. Kurkin**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, kurkin@iszf.irk.ru*

**N.M. Polekh**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, polekh@iszf.irk.ru*

**E.B. Romanova**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, ebr@iszf.irk.ru*

**Аннотация.** Исследована пространственно-временная динамика сигналов обратного рассеяния, наблюдавшихся Екатеринбургским когерентным радаром (ЕКБ-радаром) в ходе сильной двухступенчатой геомагнитной бури Святого Патрика. Было установлено, что количество сигналов, обратно рассеянных неоднородностями земли, увеличилось в начальную фазу, уменьшилось на второй ступени главной фазы и в первые два дня восстановительной фазы бури. Изменения в сигналах, обратно рассеянных в ионосфере ( $BS_i$ -сигналов), начались одновременно с главной фазой. На первой ступени наблюдалась 6-часовая серия  $BS_i$ -сигналов, дальность которых уменьшалась по мере развития бури. В течение последних 5 ч главной фазы и первых 3 ч фазы восстановления ЕКБ-радар наблюдал только сигналы, рассеянные в Е-области ионосферы. Был проведен комплексный анализ данных ЕКБ-радера и наземных ионосферных, риометрических и магнитных станций, расположенных в его поле зрения. Анализ показал, что наблюдавшаяся динамика обратного рассеяния была связана со сжатием магнитосферы, расширением конвективных вихрей, ударной ионизацией и изменением состава атмосферы во время начальной фазы, первой и второй ступеней главной фазы и фазы восстановления бури соответственно.

**Ключевые слова:** сильная геомагнитная буря, сигналы обратного рассеяния, поле зрения радара, поглощение, ионосферные и геомагнитные возмущения, полное электронное содержание.

**Abstract.** This paper examines the spatio-temporal dynamics of backscattering signals during St. Patrick's Day two-step intense geomagnetic storm from the YeKaterinburg Coherent Radar (YeKB-radar) data. It is found that a number of ground backscattering signals increased during the initial phase of the storm and decreased during the second step of its main phase and the first two days of its recovery phase. Changes in ionospheric backscattering signals started at the beginning of the main phase. During the first step, there was a six-hour sequence of ionospheric backscattering signals ( $BS_i$ -signals), the range of which decreased while the storm was in progress. During the last 5 hours of the main phase and the first 3 hours of the recovery phase, the YeKB radar observed only signals scattering in the E region of the ionosphere. We conduct a complex analysis of data from the YeKB radar, ground-based ionospheric, riometric, and magnetic stations located within the radar field of view. The analysis shows that the observed backscattering dynamics was caused by the magnetosphere compression, expansion of convection cells, impact ionization, and changes in atmospheric composition during the initial storm phase, first and second steps of the main phase, and the recovery phase, respectively.

**Keywords:** intense geomagnetic storm, backscattering signals, radar field of view, absorption, ionospheric and geomagnetic disturbances, total electron content.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на многолетние экспериментальные исследования, начатые с помощью ионозондов в двадцатые годы прошлого века, изучение ионосферных

возмущений остается одной из наиболее приоритетных задач физики околоземного космического пространства [Buonsanto, 1999; Mendillo, 2006; Goodman, 2005]. Актуальность задачи обусловлена огром-

ным влиянием ионосферы на телекоммуникационные системы, бесперебойная работа которых необходима для человечества. Проблемы, возникающие при решении этой задачи, связаны, прежде всего, с низким пространственным разрешением и потерей ионосферных данных во время больших магнитных бурь, а также с отсутствием детальной информации об электрических полях магнитосферного происхождения (магнитосферного динамо) и термосферных процессах, влияющих на развитие ионосферной бури. Часть этих проблем может быть устранена путем комплексного анализа данных, полученных различными инструментами в обследуемой области [Pokhotelov et al., 2008; Verhulst et al., 2014].

В обзоре [Mendillo, 2006] показано, что потерю и недостаточное пространственное разрешение данных по электронной концентрации в максимуме F2-слоя ионосферы ( $N_mF2$ ), полученных с помощью наземных ионозондов, можно компенсировать данными по полному электронному содержанию (ПЭС). Напомним, что по возмущениям критической частоты  $f_oF2$  этого слоя, вносящего основной вклад в ПЭС, определяют интенсивность и фазу ионосферной бури (см. например, [Брюнелли, Намгаладзе, 1988]). Пространственно-временная динамика электрических полей, возникающих в магнитосфере и передающихся вдоль силовых линий геомагнитного поля на ионосферные высоты, может быть детально изучена в областях, обследуемых радаром [Ribeiro et al., 2011]. В России такое комплексное исследование можно провести для области ионосферы, обследуемой Екатеринбургским радаром (ЕКБ-радаром) [Berngardt et al., 2015]. К сожалению, из-за малого числа GPS-приемников, размещенных в этой области, вариации ПЭС в ней могут использоваться только как вспомогательный инструмент, дающий информацию о возможных тенденциях изменения  $N_mF2$ .

Геомагнитная буря, начавшаяся 17 марта 2015 г. и названная по дню начала бурей Святого Патрика, была 13-й сильной геомагнитной бурей 24-го солнечного цикла и первой, значение  $Dst$ -индекса в которой достигло уровня ниже  $-200$  нТл [Kamide, Kusano, 2015]. Большинство опубликованных работ, посвященных ионосферным эффектам этой бури, основано на анализе данных спутниковых навигационных систем.

Анализируя данные системы ГЛОНАСС, Тертышников [2015] показал, что в первые 8 ч главной фазы бури ПЭС над Эльбрусом было выше, а в остальные 4 ч и последующие 4 дня восстановительной фазы ниже, чем средние значения этого параметра в марте 2015 г.

Авторы работы [Jacobsen, Andalsvik, 2016] использовали для проведения исследования значения ROTI (rate-of-TEC index), определенные по данным GNSS (Global Navigation Satellite System). Сопоставив пространственно-временную динамику ROTI и эквивалентных ионосферных токов, рассчитанных по данным сети IMAGE, авторы обнаружили, что самые сильные возмущения сигналов GNSS над Норвегией наблюдались на полярной границе авроральных электроджетов, и связали эти возмущения с процессами пересоединения в хвосте магнитосферы.

Базируясь на картах ROTI, полученных с помощью системы GPS в Северном полушарии, авторы работы [Cherniak, Zakharenkova, 2015] показали наличие связи между ионосферными неоднородностями, наблюдавшимися 15–20 марта 2015 г. на геомагнитных широтах  $50\text{--}75/90^\circ$  с индексами авроральной активности и мощностью, поставляемой в высокоширотную ионосферу высыпаящимися частицами.

Авторы работы [Astafyeva et al., 2015] провели комплексный анализ спутниковых и наземных данных по ПЭС (в том числе по ПЭС верхней ионосферы), электронной концентрации в максимуме F2-слоя, на высотах 460 и 530 км и отношению  $[O]/[N_2]$ , определенному по данным спутника TIMED. Авторы обнаружили значительные увеличения ПЭС верхней ионосферы в утреннем и послезакатном секторах и объяснили их ростом отношения  $[O]/[N_2]$ . Отметим, что информация об изменениях  $N_mF2$  в ходе бури, приведенная в [Astafyeva et al., 2015] не отражает, несмотря на мнение авторов, глобальную динамику этого параметра, так как в работе рассмотрены данные всего лишь десяти широко разнесенных ионозондов, расположенных на широтах от  $57^\circ S$  до  $55^\circ N$ .

Авторы работы [Liu et al. 2016] обратили внимание на то, что вариации ПЭС не всегда хорошо коррелируют с вариациями  $N_mF2$  во время геомагнитных бурь, и привели краткий обзор работ, в которых это отмечено. Они показали, что в области повышенной электронной плотности (SED — storm-enhanced density), наблюдавшейся над Северной Америкой в 16:00–24:00 UT 17 марта, значения ПЭС были выше, а  $N_mF2$  ниже, чем в соответствующие часы 16 марта. Основываясь на данных спутников COSMIC и GPS (высоты  $\sim 800$  и  $20200$  км соответственно), авторы показали, что в этом случае значения ПЭС были высокими за счет электронов, находившихся выше максимума F2-слоя. При этом электронная концентрация в нижней ионосфере уменьшилась из-за изменения состава нейтральной атмосферы. Результаты, полученные в [Liu et al., 2016], указывают на необходимость дальнейшего изучения связи между значениями ПЭС и  $N_mF2$  в различных геомагнитных условиях.

Первая информация о значительных возмущениях ионосферного радиоканала во время бури Святого Патрика была кратко представлена в работе [Popomarchuk et al., 2015] и в расширенном варианте в [Полех и др., 2016]. Основываясь на данных наклонного зондирования, полученных на трассах Норильск–Иркутск, Магадан–Иркутск, Хабаровск–Иркутск, авторы показали, что изменение структуры магнитосферы в начальную и главную фазы геомагнитной бури (17 марта) вызвало появление сигналов, распространявшихся вне дуги большого круга, а также отсутствие прохождения радиосигналов на первых двух трассах в вечерние и ночные часы. Отрицательное ионосферное возмущение, развивавшееся в восстановительную фазу, проявилось на тех же трассах в изменении модового состава в дневные и вечерне-ночные часы 18 марта и в ночные часы 19 марта, а также в 1.5–2-кратном уменьшении максимально наблюдаемых частот на всех трех трассах. В дальнейшем возмущения ионосфер-

ного радиоканала канала на субавроральных трассах, частично проходящих через поле зрения ЕКБ-радара, были изучены в [Blagoveshchensky et al., 2016].

Рассчитав по эмпирическим моделям широту главного ионосферного провала (ГИП), авторы работы [Ponomarchuk et al., 2015] объяснили возмущения радиоканалов, наблюдавшихся 17 марта, смещением ГИП до широты Иркутска ( $52.5^\circ \text{ N}$ ,  $104^\circ \text{ E}$ ). Правомерность такой интерпретации подтверждается результатами наблюдений собственного излучения верхней атмосферы Земли на геофизической обсерватории ИСЗФ, расположенной в Торах ( $51^\circ \text{ N}$ ,  $104^\circ \text{ E}$ ), т. е. на  $1.5^\circ$  южнее Иркутска [Белецкий и др., 2015; Подлесный, Михалев, 2015]. Согласно этим работам, в течение пяти ночных часов, приходящихся на главную фазу магнитной бури, в Торах наблюдалось усиление интенсивности эмиссии атомарного кислорода в линии 630 нм. Область излучения имела форму ориентированной вдоль широты дуги, смещавшейся по мере понижения *Dst*-индекса в сторону экватора. Излучения с такими свойствами принято называть SAR-дугами (stable auroral red arcs). Экспериментально доказано, что SAR-дуги сопряжены с областью взаимодействия горячих частиц кольцевого тока и холодных плазмосферных частиц, т. е. с окрестностью плазмопаузы и, соответственно, с экваториальной стенкой ГИП [Иевенко, Алексеев, 2004; Spasojevic, Fuselier, 2009].

Значительное смещение плазменных границ магнитосферы на низкие широты во время бури Святого Патрика экспериментально обнаружено в работе [Le et al., 2016]. По данным этой работы в главную фазу бури продольные токи зоны 1 и авроральный овал сместились в дневной магнитосфере до геомагнитной широты  $\sim 60^\circ$ . Рисунки 3 и 5 этой статьи позволяют определить для трех временных интервалов широту аврорального овала и продольных токов зон 1 и 2 в поле зрения ЕКБ-радара. Эту возможность мы используем в разделе 5.

Результаты, полученные в работах [Ponomarchuk et al., 2015; Белецкий и др., 2015; Подлесный, Михалев, 2015] подтверждают хорошо известную тенденцию смещения авроральных явлений в средние широты при усилении геомагнитной активности. Однако они не содержат детальной информации о пространственно-временной динамике этого процесса. Эта информация необходима для изучения связи между ионосферными и магнитосферно-гелиосферными возмущениями во время магнитных бурь. Цель нашей работы — получение такой информации путем комплексного анализа ионосферных и геомагнитных возмущений, наблюдавшихся в секторе обзора ЕКБ-радара во время бури.

При исследовании данные ЕКБ-радара будут дополнены данными риометрических, ионосферных и магнитных станций, расположенных в секторе обзора радара и вблизи него. Информация об обследуемой области и источниках анализируемых данных дана во 2-м разделе статьи, краткая характеристика магнитной бури и ее гелиосферных источников — в разделе 3. В 4 и 5 разделах мы сопоставляем изменения характеристик рассеянных сигналов с изменениями ионосферных параметров, определенных по данным ионозондов и картам ПЭС, а также с

риометрическими и геомагнитными возмущениями, наблюдавшимися во время бури в поле зрения ЕКБ-радара. Основные результаты исследования представлены в разделе 6.

## 2. АНАЛИЗИРУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В основу работы положены данные когерентного декаметрового ЕКБ-радара ( $56^\circ \text{ N}$ ,  $58^\circ \text{ E}$ ), полученные 16–22 и для сравнения 13–14 марта 2015 г. (магнитоспокойные дни). Технические характеристики радара представлены на сайте <http://sdrus.iszf.irk.ru/>, основные принципы его работы и методы обработки данных — в статьях [Berngardt et al., 2015; Mager et al., 2015]. В рассматриваемые дни ЕКБ-радар работал на частоте  $\sim 11$  МГц в обычном, действующем на 0–15 лучах режиме, обеспечивающем пространственное разрешение 45 км и временное разрешение 1–2 мин. Подобно радарам, входящим в сеть SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network), ЕКБ-радар измеряет автокорреляционную функцию сигналов обратного рассеяния. Затем по стандартной методике определяются характеристики принятых сигналов [Ponomarenko, Waters, 2006]. В нашей работе используются следующие:

$P_1$  — соотношение мощностей сигнала/шума;

$V_D$  — доплеровская скорость вдоль луча радара (положительна в направлении на радар и отрицательна в направлении от него);

$w$  — спектральная ширина сигнала;

$R$  — дальность.

Для краткости изложения ниже мы будем обозначать мощность  $P_1$ , сигналы обратного рассеяния — термином BS-сигналы (backscattered signals), рассеивающие ионосферные неоднородности — аббревиатурой FAEDIs (field-aligned electron density irregularities) и использовать нижние индексы *i* и *g* соответственно для обозначения сигналов, рассеянных FAEDIs и неоднородностями земли [Blanchard et al., 2009]. Остальные редко употребляемые обозначения будут введены в соответствующих разделах статьи.

Для выделения BS<sub>*i*</sub>-сигналов мы использовали критерий  $|V_D| > 50$  м/с,  $w > 30$  м/с [Oinats et al., 2015]. Исправленные геомагнитные координаты *i*- и *g*-рассеивателей (широта  $\varphi'$  и долгота  $\lambda'$ ) определялись по стандартной модели AACGM, используемой для данных SuperDARN [Baker, Wing, 1989].

Траектории 0–15 лучей радара, номера которых увеличиваются с запада на восток, показаны на рис. 1. Кружками отмечено положение 7 из 11 наземных станций, данные которых были использованы в работе. Названия, географические и исправленные геомагнитные координаты станций и их IAGA/URSI коды даны в табл. 1. В исправленной геомагнитной системе координат поле зрения радара охватывает широты  $55$ – $80^\circ$  и долготы  $131.5$ – $184.5^\circ$ , что соответствует 3.5-часовому сектору магнитного местного времени (MLT).

При анализе использовались данные по солнечному ветру и ММП (межпланетному магнитному полю), полученные на спутнике ACE [<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/>]; значения ПЭС и магнитные измерения обсерваторий ААНИИ [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>];

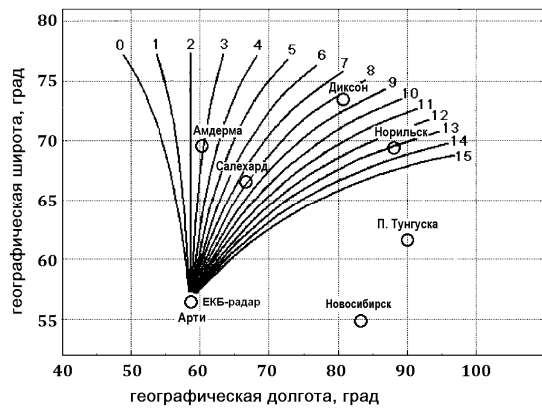


Рис. 1. Траектории 0–15 лучей ЕКБ-радара и положение наблюдательных пунктов в географической системе координат

Таблица 1  
Координаты магнитных (m), ионосферных (i) и риометрических (r) станций

№	станция	IAGA/URSI код	координаты			
			географические		исправленные геомагнитные	
			широта	долгота	широта	долгота
1	Диксон <sup>m, i, r</sup>	DIK/DI373	73.5	80.7	69.4	156.3
2	Амдерма <sup>m, r</sup>	AMD	69.6	60.2	65.9	136.5
3	Норильск <sup>m, i</sup>	NOK/NO369	69.4	88.1	65.5	162.5
4	Салехард <sup>i</sup>	SD266	66.5	66.5	62.9	141.4
5	п. Тунгуска <sup>i</sup>	TZ362	61.6	90.0	57.9	163.9
6	Арти <sup>m</sup>	ARS	56.4	58.57	53.0	132.1
7	Новосибирск <sup>m</sup>	NVS	54.8	83.2	51.2	156.7
8	Певек <sup>m</sup>	PVK	70.1	170.9	65.8	232.1
9	Тикси <sup>m, r</sup>	TIK	71.6	128.8	66.5	198.6
10	Якутск <sup>m, i</sup>	YAK/YA462	62.0	129.6	56.8	202.1
11	Абиско <sup>m</sup>	ABK	68.4	18.8	65.6	100.8

данные сети INTERMAGNET [http://www.intermagnet.org/index-eng.php]; графики риометрического поглощения [http://geo-phys.aari.ru/interface2.html]; ионограммы, взятые на сайте [http://space-weather.ru/index.php?page=iono-grammy]; геомагнитные индексы, магнитные и ионосферные данные обсерваторий ИСЗФ. Исправленные геомагнитные координаты наземных станций (широта  $\phi'$  и долгота  $\lambda'$ ) были рассчитаны с помощью программы, доступной на [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm\_vitmo.html]. Магнитные данные ААНИИ представлены на указанном выше сайте компонентами  $B_n$ ,  $B_e$  и  $B_z$ , направленными на север, восток и вертикально вниз соответственно.

### 3. ГЕЛИОСФЕРНЫЕ И ГЕОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

Судя по значениям  $Dst$ -индекса, магнитная буря Святого Патрика началась после 04:00 UT 17 марта, достигла максимума к концу этого дня и закончилась после 14:00 UT 25 марта. Началу бури предшествовали 8 дней низкой и умеренной геомагнитной активности. С 9 по 15 марта среднесуточный  $A_p$ , суммарный  $K_p$  и  $Dst$ -индексы менялись, соответственно, в пределах 4–9, 8–16 и –14–18 нТл. Повышение геомагнитной активности произошло 16 марта. Индексы увеличились до  $A_p=12$ ,  $K_p=19$ – и  $Dst=2$ –29 нТл.

Более детальную информацию о динамике кольцевого тока дает график изменения  $SYM-H$ -индекса, приведенный с графиками  $Dst$ ,  $K_p$  и  $AE$ -индексов на рис. 2, а. По тенденциям изменения  $SYM-H$ -индекса 04:45–06:22 и 06:23–23:06 UT 17 марта соответствуют начальной и главной фазам бури. Момент SSC (внезапное начало бури) и начало главной фазы отмечены вертикальными пунктирными линиями, обозначенными, соответственно, SSC и M. Главная фаза состояла из двух ступеней [Kamide et al., 1998]. Линия, обозначенная  $M_0$ , отмечает первый минимум  $SYM-H$ -индекса в 09:37 UT; линия, обозначенная  $M_1$ , — начало второго понижения  $SYM-H$  в 12:07 UT (начало второй ступени).

Выше мы отметили, что  $Dst$ -индекс стал положительным во второй половине 25 марта. Однако относительно быстрый и устойчивый рост  $Dst$  и  $SYM-H$  наблюдался только с 23:06 UT 17 марта до 17:57 UT 18 марта. В первые 70 мин средняя скорость изменения  $SYM-H$  ( $\Delta SYM-H/\Delta UT \approx 53$  нТл/ч) была в 7 раз выше, чем в последующие 17.5 ч ( $\Delta SYM-H/\Delta UT \approx 7.6$  нТл/ч). Это дает основание определить интервалы 23:06–00:15 UT 17–18 и 00:16–17:57 UT 18 марта как раннюю восстановительную фазу и часть поздней восстановительной фазы магнитной бури [Dasso et al., 2002]. На рис. 2 начала указанных интервалов отмечены линиями R и  $R_1$ . Линия  $R_2$  отмечает конец устойчивого роста  $SYM-H$ . Для определения фоновых значений ионосферных параметров мы выбрали 13 и 14 марта — дни относительно низкой магнитной и авроральной активности.

По информации, размещенной на [www.solen.info/solar/old\_reports/] геомагнитная буря 17–25 марта 2015 г. развивалась под действием высокоскоростных потоков из четырех корональных дыр и межпланетного коронального выброса. Источником геомагнитных возмущений первой ступени главной фазы была рекуррентная вращающаяся область взаимодействия (co-rotating interaction region, CIR), второй — комбинация CIR и межпланетного коронального выброса (interplanetary coronal mass ejection, ICME).

Вариации четырех внешних параметров, оказывающих основное влияние на околоземное космическое пространство, показаны на рис. 3. Это  $B_z$ - и  $B_y$ -компоненты ММП ( $B_z$ -ММП и  $B_y$ -ММП), радиальная скорость  $V_{sw}$  и лобовое давление (ram pressure,  $P_{sw}$ ) солнечного ветра. Графики построены по данным спутника ACE (координаты  $x, y, z_{GSE} \sim 220, -8, -23R_E$ ) для 00:00–24:00 UT 16–22 марта. В это время спутник находился на расстоянии  $(23 \div 27)R_E$  от линии Солнце–Земля и, следовательно, давал адекватную информацию о параметрах межпланетной среды на границе магнитосферы [King, 1986; Ericsson et al., 2000]. Графики построены с учетом времени переноса каждого фрагмента гелиосферной плазмы от спутника до магнитосферы,  $\Delta UT = (x_{GSE} - R_{mag})/V_{sw}$ . Здесь  $R_{mag}$  — расстояние до магнитосферы, определенное из условия равенства давлений солнечного ветра и геомагнитного поля на магнитопаузе. Вертикальные пунктирные линии соответствуют тем, которые показаны на рис. 2. На нижней панели рис. 3 приведен график напряженности поля

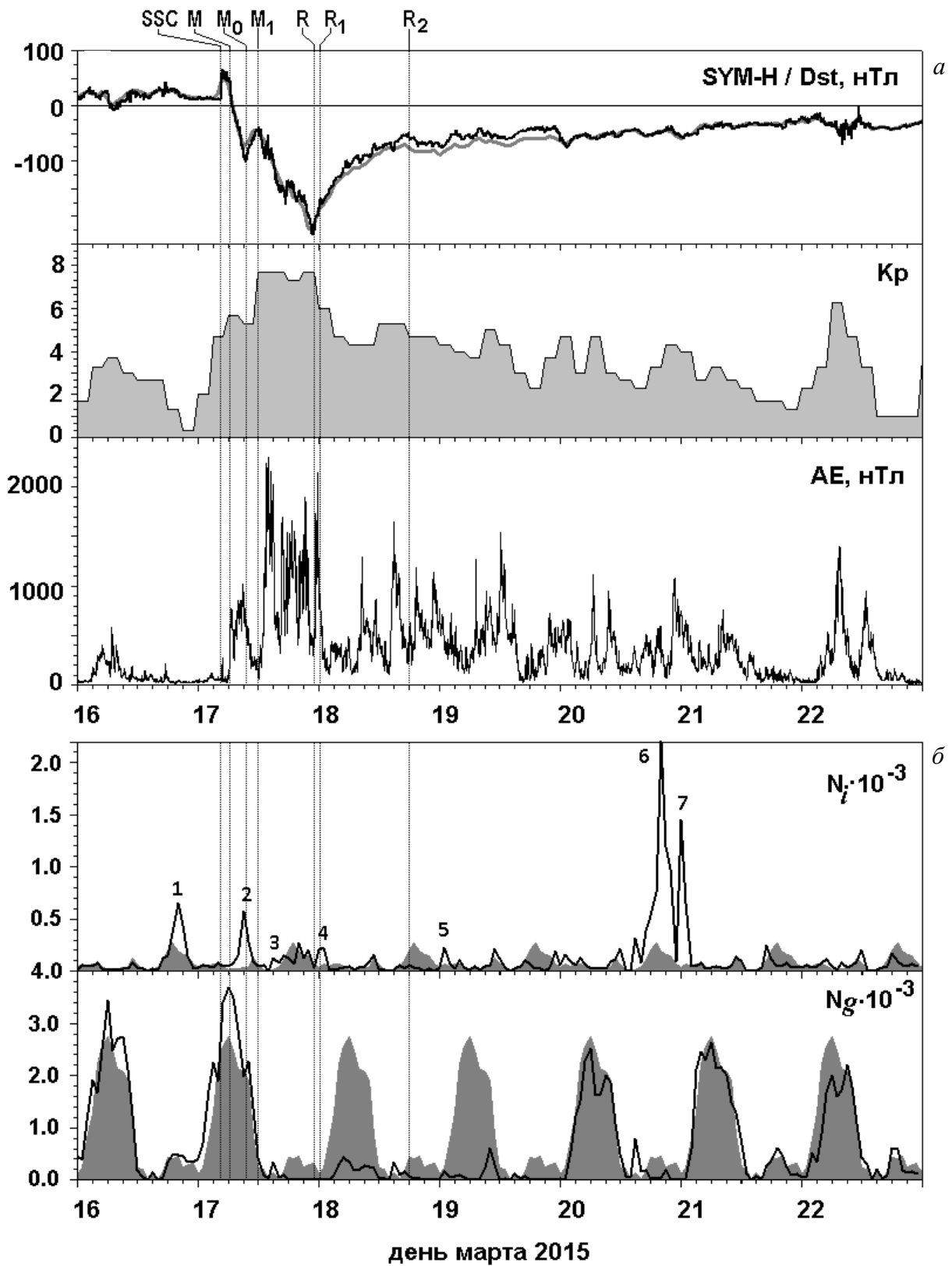


Рис. 2. Для 16–22 марта сверху вниз показаны вариации: а — SYM-H/Dst (черная/серая линия), K<sub>p</sub> и AE-индексов геомагнитной активности; б — числа BS<sub>i</sub>- и BS<sub>g</sub>-сигналов, принятых в течение часа ЕКБ-радаром 13–14 (серая заливка) и 16–22 (черные линии) марта

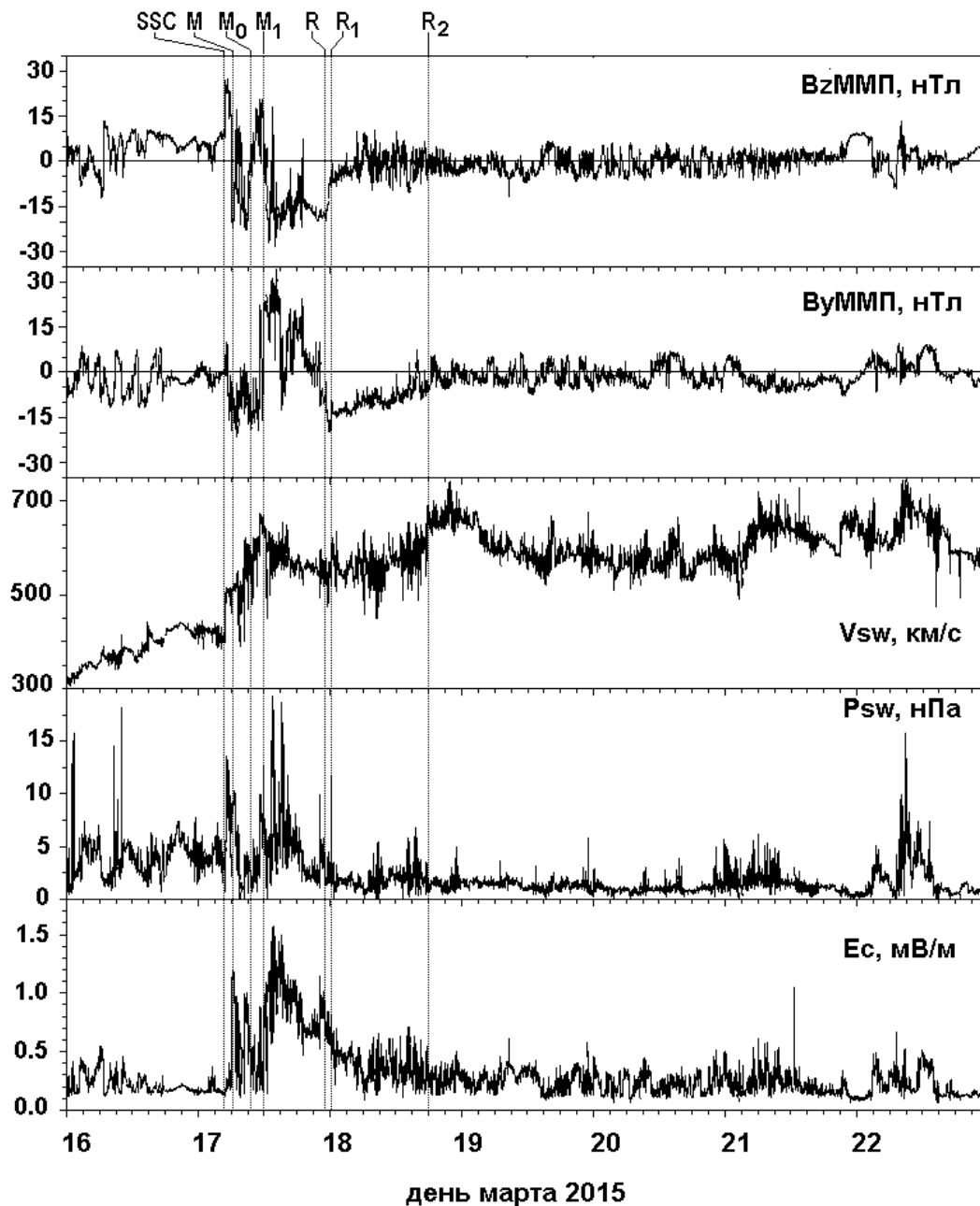


Рис. 3. Вариации  $B_z$ - и  $B_y$ -компонент межпланетного магнитного поля, скорости и лобового давления солнечного ветра, построенные по данным спутника ACE. На нижней панели показаны изменения напряженности поля магнитосферной конвекции  $E_c$ , вычисленной по этим данным

магнитосферной конвекции  $E_c$ , вычисленной по значениям  $V_{sw}$ ,  $P_{sw}$ ,  $B_y$  и  $B_z$  ММП (использованы формулы, приведенные в [Burke et al., 2007]).

По данным ACE около 05:00 UT 17 марта скорость солнечного ветра вблизи Земли резко возросла от 400 до 500 км/с и оставалась высокой ( $V_{sw} \sim 600 \pm 50$  км/с) до конца 25 марта. Сравнивая рис. 2 и 3, видим, что сразу после SSC видно слабое кратковременное (около 10 мин) усиление  $AE$ -индекса авроральной активности до 270 нТл. Начало главной фазы (момент M) соответствует уменьшению  $P_{sw}$ , переходу от положительной к отрицательной  $B_z$  ММП и усилению  $E_c$  до  $\sim 1.2$  мВ/м.

На первой ступени главной фазы видно бухтообразное увеличение  $AE$ -индекса до  $\sim 1000$  нТл в ин-

тервале M– $M_0$  (в нем  $B_z$  ММП изменяется от  $-22$  до 17 нТл) и его понижение до  $\sim 200$  нТл в интервале  $M_0$ – $M_1$  ( $B_z$  ММП изменяется от  $-4$  до 20 нТл). На всем протяжении 1-й ступени  $B_y$  ММП  $< 0$ . Лобовое давление солнечного ветра немонотонно уменьшается от 10 до 2 нПа (ниже, чем до начала бури), затем увеличивается до среднего  $P_{sw} \sim 8$  нПа в 10:30–11:30 UT.

На второй ступени главной фазы  $B_z$  ММП преимущественно отрицательна,  $B_y$  ММП положительна, поле конвекции усилено до максимальных для данной бури значений  $E_c \sim 0.7$ – $1.5$  мВ/м. В 12:56–15:11 UT виден самый высокий пик  $AE$  с максимумом  $\sim 2300$  нТл, соответствующий по времени двум самым мощным усилениям  $P_{sw}$  до  $\sim 18$  нПа (интервал 12:30–15:00 UT на рис. 3), первое из которых

сопровождалось кратковременным поворотом  $B_z$ ММП на север. За главным пиком последовали множественные усиления  $AE$ -индекса до 1500–1800 нТл, не связанные явным образом с изменениями гелиосферных параметров. Это типично для магнитосферы, находящейся во время магнитных бурь в неравновесном состоянии. В таких случаях спорадические усиления авроральной активности могут быть вызваны даже малейшими изменениями условий на границе магнитосферы [Bargatze et al., 1985; Sharma et al., 2005].

Ранняя восстановительная фаза бури (интервал  $R-R_1$ ) началась при резком уменьшении  $P_{sw}$  от 4 до 2 нПа и ослаблении  $E_c$  от 0.9 до 0.5 мВ/м. В раннюю восстановительную фазу наблюдалось бухтообразное увеличение  $AE$ -индекса до 2145 нТл в 23:45 UT. Этот максимум  $AE$  соответствует по времени скачку  $P_{sw}$  от 2 до 11 нПа.

К концу ранней восстановительной фазы  $B_z$ ММП достигает уровня  $-5$  нТл,  $P_{sw} \sim 1.5$  нПа,  $E_c \sim 0.5$  мВ/м. На поздней восстановительной фазе  $B_z$ ММП изменяется от  $-10$  до  $5$  нТл,  $P_{sw} = 0.5-2$  нПа, среднее значение  $E_c$  уменьшается до  $\sim 0.25$  мВ/м. В 01:00–07:30 UT 18 марта  $AE \leq 400$  нТл. Затем авроральная активность усиливается. В 08:32, 11:19 и 14:57 UT видны максимумы  $AE = 1286, 870$  и  $1647$  нТл соответственно.

Для удобства сопоставления с дальнейшим содержанием статьи основная информация о геомагнитных возмущениях 17–18 марта и их возможных внемагнитосферных триггерах дана в табл. 2.

#### 4. ДИНАМИКА СИГНАЛОВ, РАССЕЯННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ЗЕМЛИ

Рассмотрим характеристики  $BS_g$ -сигналов, наблюдавшихся 17–22 марта и в дни низкой и умеренной геомагнитной активности 13, 14, 16 марта. Начнем с суточных распределений  $N_g$  (числа  $BS_g$ -сигналов, принятых ЕКБ-радаром в течение часа; см. рис. 2, б). Видно, что за день до бури, 16 марта, изменения  $N_g$  подобны наблюдавшимся в магнитоспокойные дни. График  $R_g(UT)$ , приведенный на рис. 4, тоже подобен построенным для 13–14 марта (на рисунке не показаны). Он демонстрирует типичный суточный ход дальности  $BS_g$ -сигналов, наблюдаемых на среднеширотных радарх. Для них характерно плавное уменьшение дальности от максимальных ночных  $R_g = 2500-3000$  км до минимальных дневных  $R_g = 800-1500$  км и увеличение  $R_g$  в вечерние часы [Bland et al., 2014; Mager et al. 2015]. Такой суточный ход  $R_g$  обусловлен суточными изменениями электронного содержания и высоты максимума F2-области ионосферы. Значения  $N_g$  максимальны в дневные часы (04–10 UT,  $N_g > 2500$ ) и минимальны в вечерние часы (13–16 UT,  $N_g < 300$ ). Увеличение  $N_g$  сопровождается ростом максимальной мощности  $P_{lg}$ .

Отличия  $BS_g$ -сигналов 17–18 марта от сигналов, наблюдавшихся в те же часы 13–14 марта, проявляются в следующем.

(i) Увеличение числа  $BS_g$ -сигналов в интервале 05:00–09:00 UT 17 марта на  $\sim 1000$  относительно фоновых  $N_g$ .

(ii) Волнообразные понижения минимальных  $R_g$  в 04:45–12:00 UT 17 марта.

(iii) Резкое уменьшение  $N_g$  после 18:00 UT 17 марта.

Сравнивая график  $N_g(UT)$  с графиками  $f_oF2(UT)$ , показанными на рис. 5, видим, что пик  $N_g$ , отмеченный в (i), на час опережает пик  $f_oF2$ , наблюдавшийся только на ст. DI373 в 06:00–08:10 UT (максимум  $f_oF2 = 8.46$  МГц в 07:25 UT). На графике  $R_g(UT)$  (рис. 4) этому пику  $N_g$  соответствует полоса  $BS_g$ -сигналов, приходящих с дальностей 2100–2300 км (0–8 лучи, широты 74–77°). Учитывая данные табл. 2, мы полагаем, что сжатие магнитосферы в начальную фазу и первые 2 ч главной фазы в совокупности с пересоединением на дневной магнитопаузе [Le et al., 2016] привели к увеличению критической частоты F2-слоя ионосферы на широтах 74–77° N в секторе 08:00–13:00 LT, что проявилось в росте  $f_oF2$  над ст. Диксон (широта 73.5° N, близка к 8 лучу) и в увеличении числа  $BS_g$ -сигналов, принятых лучами 0–8. На рис. 6 графики ПЭС, построенные по 15-мин значениям, сопоставлены с графиками  $N_mF2$ , вычисленной по 15-мин значениям  $f_oF2$ . Видно, что на станции Диксон пику  $N_mF2$  соответствует пик ПЭС. На станциях, расположенных южнее, виден только пик ПЭС, максимум которого сместился за 75 мин от ст. NO369 до станций SD266 и TZ362. Возможно, что нарушение связи между вариациями ПЭС и  $N_mF2$  в этом случае объясняется, так же как в [Liu et al., 2016], увеличением электронного содержания верхней ионосферы, не распространившимся в область высот, доступных ионозондам.

Указанная в (ii) особенность  $BS_g$ -сигналов проявилась в том, что в интервале 04:45–12:00 UT нижняя граница их дальностей понижалась до 700 км в  $\sim 05:00$  UT, 600 км в  $\sim 07:20$  UT, 700 км в 08:40 UT и до 400 км в 10:30–11:30 UT. Сопоставляя изменения  $R_g$  с данными табл. 2, относящимися к изменениям  $SYM-H$  и пикам  $AE$ -индекса, видим, что первое уменьшение минимальной дальности последовало за SSC, второе и третье — за бухтообразными усилениями авроральной активности. Четвертое, последнее уменьшение  $R_g$  сопровождало увеличение  $SYM-H$ -индекса (начало интервала  $M_0-M_1$ , табл. 2), развивавшееся после перехода к  $B_z$ ММП  $> 0$  и усиления лобового давления солнечного ветра (описаны в разделе 3). На графиках рис. 5 видно, что ст. NO369 зафиксировала в этом временном интервале отсутствие ионосферных отражений и пониженные до  $\sim 60-80\%$  от спокойного уровня величины  $f_oF2$  в 10:30–12:15 UT. На станциях SD266 и TZ362 наблюдались флуктуации  $f_oF2$  с периодами 30–120 мин и размахом  $\sim 0.5-2$  МГц, сменившиеся после 13:00 и 12:30 UT, соответственно, отсутствием отражений от F2-области.

Обсудим указанное в (iii) уменьшение числа  $BS_g$ -сигналов. На рис. 2, б видно, что в 12:00–17:00 UT

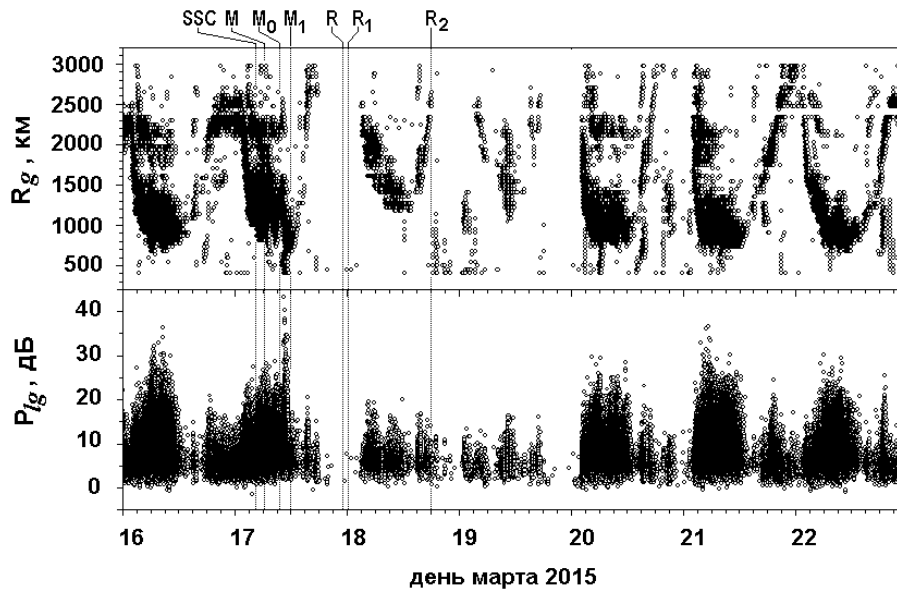


Рис. 4. Для 16–22 марта 2015 г. показаны вариации дальности  $R_g$  и мощности  $P_{1g}$  сигналов, рассеянных неоднородностями земли.

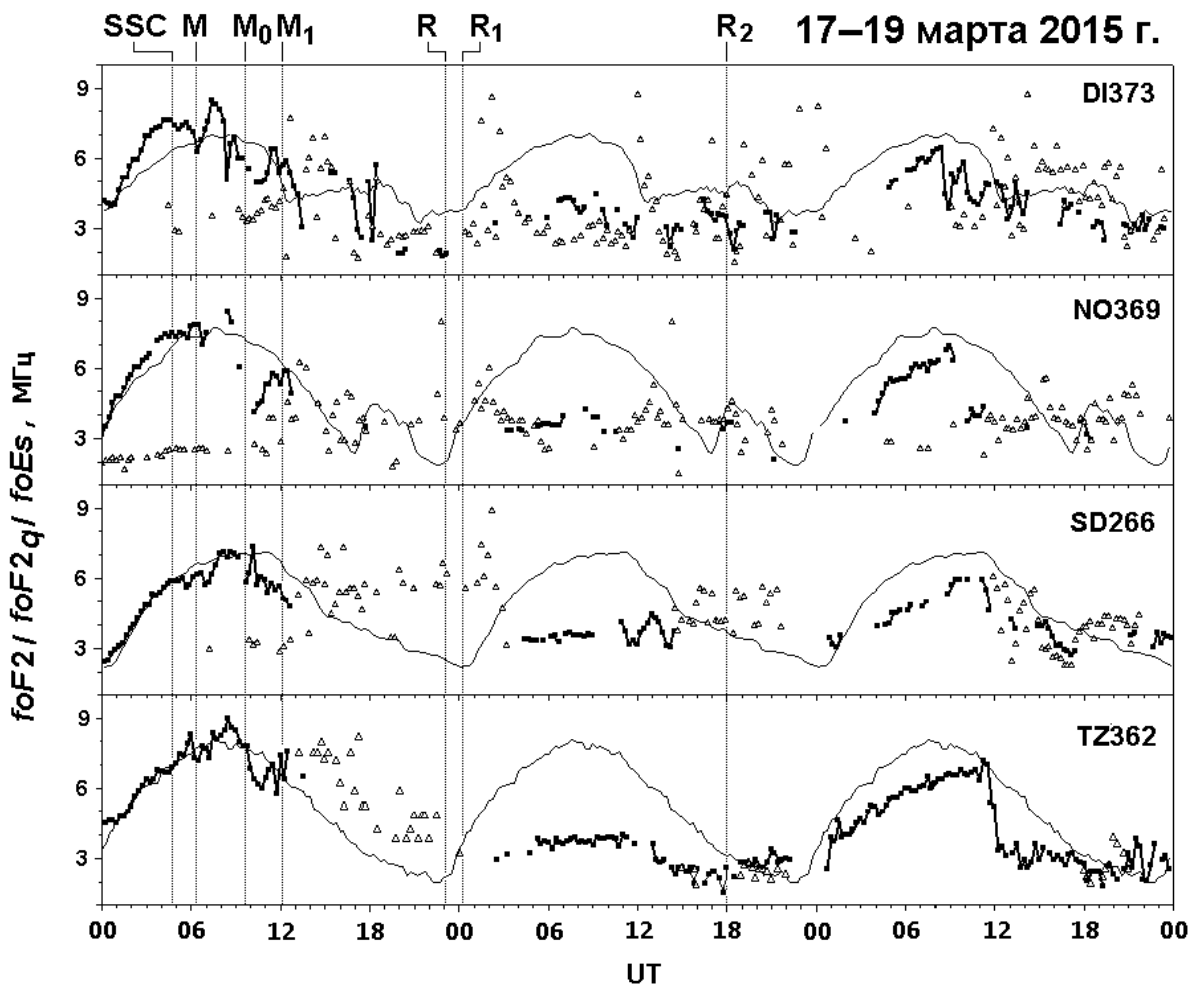


Рис. 5. Для 17–19 марта 2015 г. показаны вариации критической частоты F2-слоя ( $f_oF2$ ) и предельной частоты  $E_s$ -слоя ( $f_oE_s$ ) ионосферы над тремя станциями, расположенными в секторе обзора ЕКБ-радар, и над ст. TZ362, находящейся в  $6.3^\circ$  к югу от него. Вариации текущих значений  $f_oF2$  показаны толстыми линиями и квадратами, фоновых — тонкими линиями,  $f_oE_s$  — треугольниками



Таблица 2

Геомагнитные возмущения 17–18 марта и их возможные триггеры.  
В колонке UT/UTmax указаны время наблюдения пика/максимума  $AE$ -индекса.  
Значения  $AE$  в максимуме даны в колонке «максимум»

Интервал	UT	фаза бури	пики $AE$ -индекса		
			UT/UTmax	максимум, нГл	возможный триггер
SSC–M	04:45–06:22 17.03	начальная	04:45–04:54/ 04:47	269	$\Delta P_{sw} > 0$
M–M <sub>0</sub>	06:23–09:37 17.03	главная, 1-я ступень	06:09–07:09/ 06:38 07:12–10:36/ 08:52	772 1016	$\Delta P_{sw} < 0$ , $\Delta B_z$ ММП>0 рост $E_c$ $\Delta P_{sw} > 0$ , $\Delta B_z < 0$ рост $E_c$
M <sub>0</sub> –M <sub>1</sub>	09:38–12:06	главная, рост $SYM-H$	нет		переход к $B_z$ ММП>0 уменьшение $E_c$
M <sub>1</sub> –R	12:07–23:05 17.03	главная, 2-я ступень	12:56–15:14/ 13:58 16:14–21:53	2298 множество максимумов в 1200–1900	$\Delta P_{sw} > 0$ , $\Delta B_z$ ММП<0 рост $E_c$ не определены
R–R <sub>1</sub>	23:06–00:15 17–18.03	ранняя восстановительная	23:14–24:00/ 23:17 23:42	1731 2145	$\Delta P_{sw} < 0$ , $\Delta B_z$ ММП>0 $\Delta P_{sw} > 0$ , $\Delta B_z$ ММП>0, $\Delta B_z$ ММП>0
R <sub>1</sub> –R <sub>2</sub>	23:07–17:57 17–18.03	часть поздней восстановительной	07:41–12:58 08:32 14:01–17:38 14:57	1286 1647	не определен $\Delta P_{sw} > 0$ , $\Delta B_z$ ММП<0

значения  $N_g$  близки, а в 15:00 UT даже в 2.5 раза выше, чем в те же часы 13–14 марта. В 18:00–14:00 UT 17–18 марта число BS<sub>1</sub>-сигналов падает до ~2–25 %, в 18:00–24:00 UT 18 марта — до ~0.3–11 % от фоновых значений.

На рис. 5 видно, что на станциях NO369, SD266 и TZ362 с 13:00 до 23:00 UT, а на ст. DI373 с 12:00 до 16:40 UT 17 марта наблюдались спорадические  $E$ -слои с предельными частотами  $f_oE_s$ , близкими к фоновым значениям  $f_oF2$  или превышающими их. Это косвенно указывает на то, что возможной причиной отсутствия отражений от F2-слоя, а в нескольких сеансах зондирования — от всей ионосферы, как и значительного уменьшения  $N_g$ , было не уменьшение электронной концентрации в F2-области, а ее увеличение в  $E$ - и  $D$ -областях ионосферы. Сопоставление графиков ПЭС с графиками  $N_mF2$  (рис. 6) показывает, что отражения от F2-слоя отсутствуют даже в тех случаях, когда значения ПЭС над станциями выше фоновых, что служит аргументом в пользу сделанного предположения. Не исключено, однако, что и в этом случае большие значения ПЭС были связаны с ростом электронной концентрации в верхней (выше максимума F2-слоя) ионосфере и не отражали изменений  $N_mF2$  над станциями. Наиболее явно эффект отсутствия отражений во время высоких значений ПЭС выражен в 14:00–17:00 UT 17 марта. В этом интервале UT на графиках всех станций виден пик ПЭС, высота которого над уровнем фона максимальна на ст. TZ362 (~8 TECU в 15:00 UT) и минимальна на ст. DI373 (~1.5 TECU в 15:30 UT).

В 00:00 UT 18 марта ситуация резко меняется. Значения ПЭС над станциями NO369, SD266 и TZ362 снижаются до уровня ~35–45 % от фонового. На станциях эпизодически наблюдаются отражения от F2-слоя с низкой  $N_mF2$ , составляющей ~20–30 % от фоновых значений. Момент 00:00 UT соответствует

06:00 MLT в Норильске и П. Тунгуске, 05:00 MLT — в Салехарде. На ст. YA462, находящейся на 3 ч восточнее и близкой по широте к ст. TZ362, переход к низкому ПЭС произошел на 3 ч раньше — в 21:00 UT (~06:00 MLT) 17 марта. Графики для YA462 показаны на нижней панели рис. 6. Все это указывает на то, что в конце главной фазы геомагнитной бури в окрестности утреннего меридиана сформировалась резкая западная граница области отрицательного ионосферного возмущения, связанного с изменением состава нейтральной атмосферы. Область отношения  $[O]/[N_2] < 0.5$  с резкими границами действительно видна на карте широтно-долготного распределения этого параметра, приведенной для 18 марта 2015 г. на сайте [<http://guvi.jhuapl.edu/site/da-ta/guvi-data-products.shtml>]. Западная, восточная и экваториальная границы области низких значений  $[O]/[N_2]$  находились 18 марта на меридианах 80° E, 150° E и широте 25° N соответственно. На графиках рис. 8, с из работы [Astafyeva et al., 2015] видно, что, если в 03:00–06:00 UT 17 марта в области 55–80° N, 50–100° E (в поле зрения ЕКБ-радар) отношение  $[O]/[N_2]$  было ~0.5, то в это же время 18 марта оно упало до ~0.1.

## 5. ДИНАМИКА СИГНАЛОВ, РАССЕЯННЫХ В ИОНОСФЕРЕ

На рис. 2, б цифрами 1–7 отмечены пики, значения  $N_i$  в которых в 3–40 раз больше, чем в соответствующие часы 13–14 марта. На рис. 7, а первому и 3–7 пикам соответствуют изолированные дискретные  $R_i$ -структуры, образованные скоплениями точек, пику 2 — конец серии дискретных структур уменьшающейся дальности. В работе [Ribeiro et al., 2011] показано, что такие скопления точек образуются при рассеянии на FAEDIs и их доплеровские скорости могут быть использованы для определения направ-

17–19 марта 2015 г.

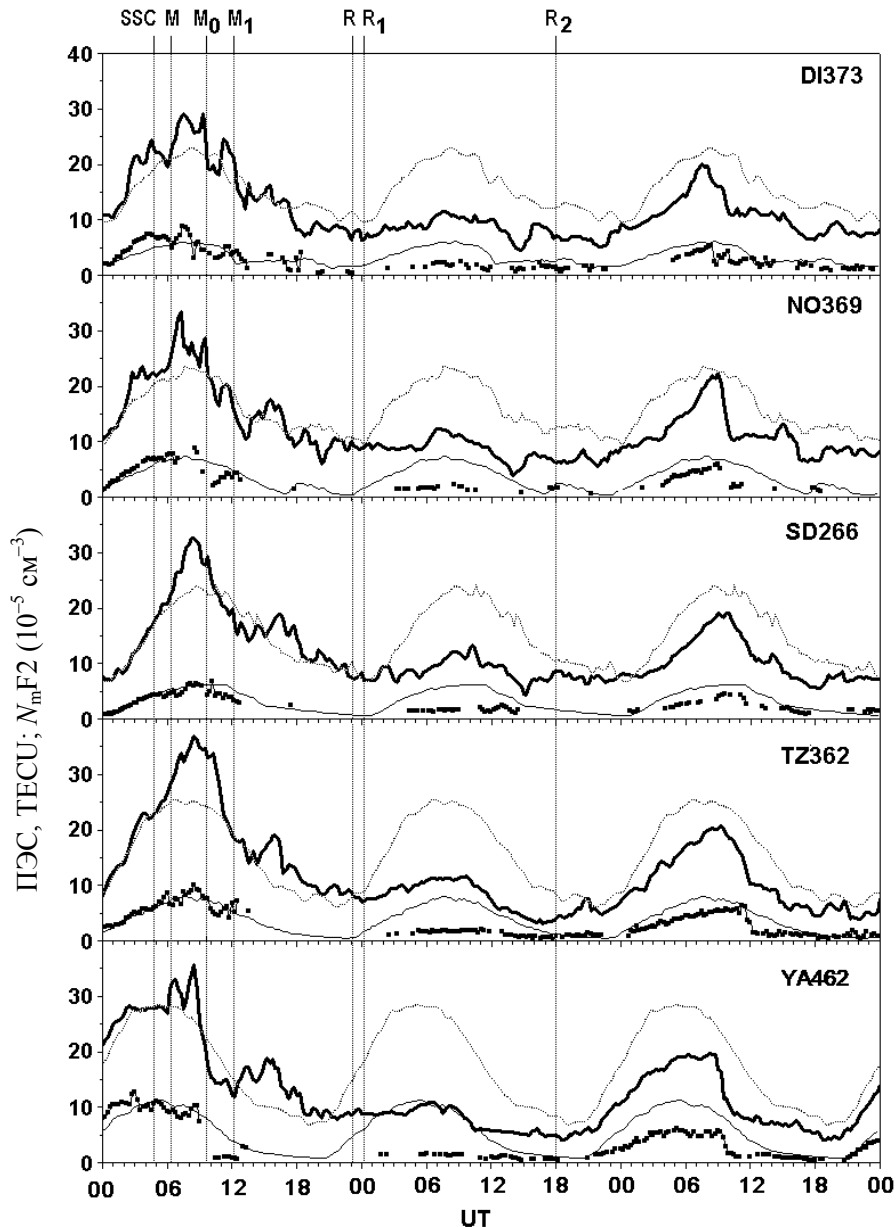


Рис. 6. Вариации ПЭС и электронной концентрации  $N_mF2$  в максимуме F2-слоя над пятью ионосферными станциями. Названия станций указаны на панелях. Текущие и фоновые значения ПЭС показаны, соответственно, толстой и точечной линиями;  $N_mF2$  — тонкой линией с квадратами и тонкой линией

ления перпендикулярной к лучу зрения радара компоненты электрического поля (см. также [Davies et al., 1999; Milan, Lester, 2001; Makarevich et al., 2009] и цитируемую в них литературу). Ввиду важности этой задачи рассмотрим динамику дискретных  $BS_i$ -структур и сравним ее с развитием геомагнитных возмущений.

Структура, отмеченная на рис. 2, б и 7, а цифрой 1, представлена на рис. 8, а. В данном случае точки рассеяния образуют узкую горизонтальную полосу ( $\varphi'=66-69^\circ$ ), стабильно наблюдавшуюся в течение трех часов при низкой авроральной активности ( $AE \sim 30$  нТл). Такая же, но более широкая структура ( $\varphi'=62-68^\circ$ ), показанная на рис. 8, б, наблюдалась 14 марта при  $AE \sim 180$  нТл на фазе восстановления

слабого, глубиной  $\sim 200$  нТл, возмущения геомагнитного поля, наблюдавшегося только на Диксоне.

Самая широкая горизонтальная структура, отмеченная цифрой 6, показана на рис. 8, в вместе со структурой 7. Структура 6 развивалась на широтах  $\varphi'=60-70^\circ$  при относительно высокой авроральной активности ( $AE \sim 80-600$  нТл). Она началась на фазе роста и закончилась в конце фазы восстановления отрицательного бухтообразного возмущения геомагнитного поля глубиной  $\sim 600$  нТл, наблюдавшегося в Норильске и Амдерме.  $BS_i$ -сигналы появились на фазе роста бухтообразного возмущения, исчезли в его максимуме и вновь появились на фазе восстановления. Судя по знакам  $\Delta H < 0$ ,  $\Delta Z > 0$ , в минимуме бухты в 19:00–20:00 UT, сопровождавшемся

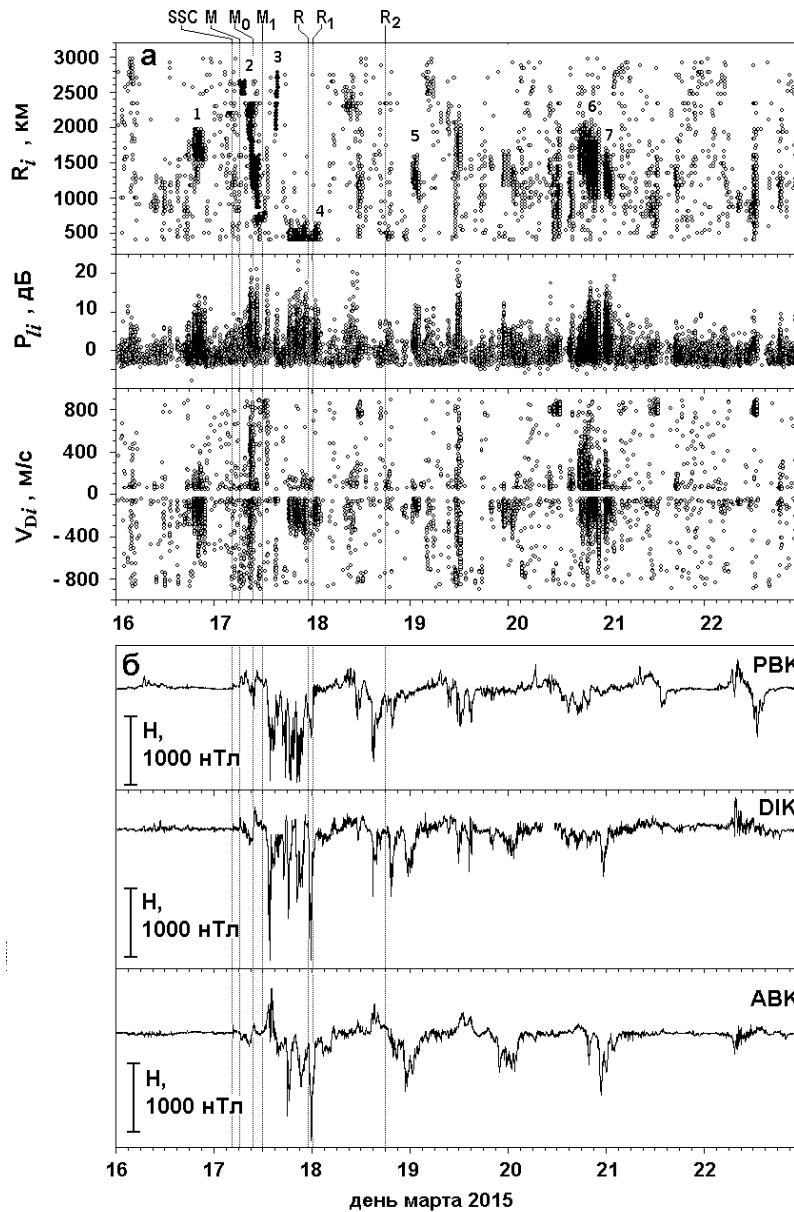


Рис. 7. Вариации дальности  $R_i$  (а), мощности  $P_{ii}$  и доплеровской скорости  $V_{Di}$  сигналов, обратно рассеянных в ионосфере;  $H$ -компоненты геомагнитного поля на трех авроральных станциях (б)

пиком риометрического поглощения, центр западного джета находился южнее NOK и AMD, а  $BS_i$ -сигналы отсутствовали. На Диксоне в это время наблюдались три бухты с  $\Delta H \sim 200$  нТл (см. рис. 7, б), совпадающие с пиками  $AE$ . Карты, построенные для дискретной структуры, указывают на переход поля зрения радара из области меридиональных потоков, направленных в сторону радара, в область зональных потоков, направленных от радара. Видно смещение экваториальной границы области FAEDIs до  $\phi'_i \sim 60^\circ$  в ходе события. За время его наблюдения поле зрения радара сместилось из сектора 21:00–00:30 в сектор 01:00–04:30 MLT.

На картах, приведенных на рис. 8, а, б и для 20 марта на рис. 8, в, видно, что FAEDIs с  $V_{Di} > 0$  ( $< 0$ ) наблюдались в предполуночные и полуночные часы преимущественно в западной (восточной) части

поля зрения радара. Наличие на широтах  $\phi' = 60\text{--}70^\circ$  разнесенных по долготе областей с различными знаками  $V_{Di}$  указывает на то, что во время их наблюдения в поле зрения радара находились две области повышенной напряженности поля магнитосферной конвекции. Это (1) западная область, в которой перпендикулярная к лучам радара компонента  $E_c$  направлена на северо-запад (с утра на вечер) и  $V_{Di} > 0$ , и (2) восточная область с направленной на юго-восток компонентой  $E_c$  и  $V_{Di} < 0$ . Первая область соответствует антисолнечным потокам ионосферной плазмы, вторая — западному электроджету. Тот факт, что эти две области наблюдались в окрестности полуночи, а также долготное разделение FAEDIs с разными направлениями дрейфа позволяет нам предположить, что эти явления были зафиксированы в окрестности разрыва Харанга.

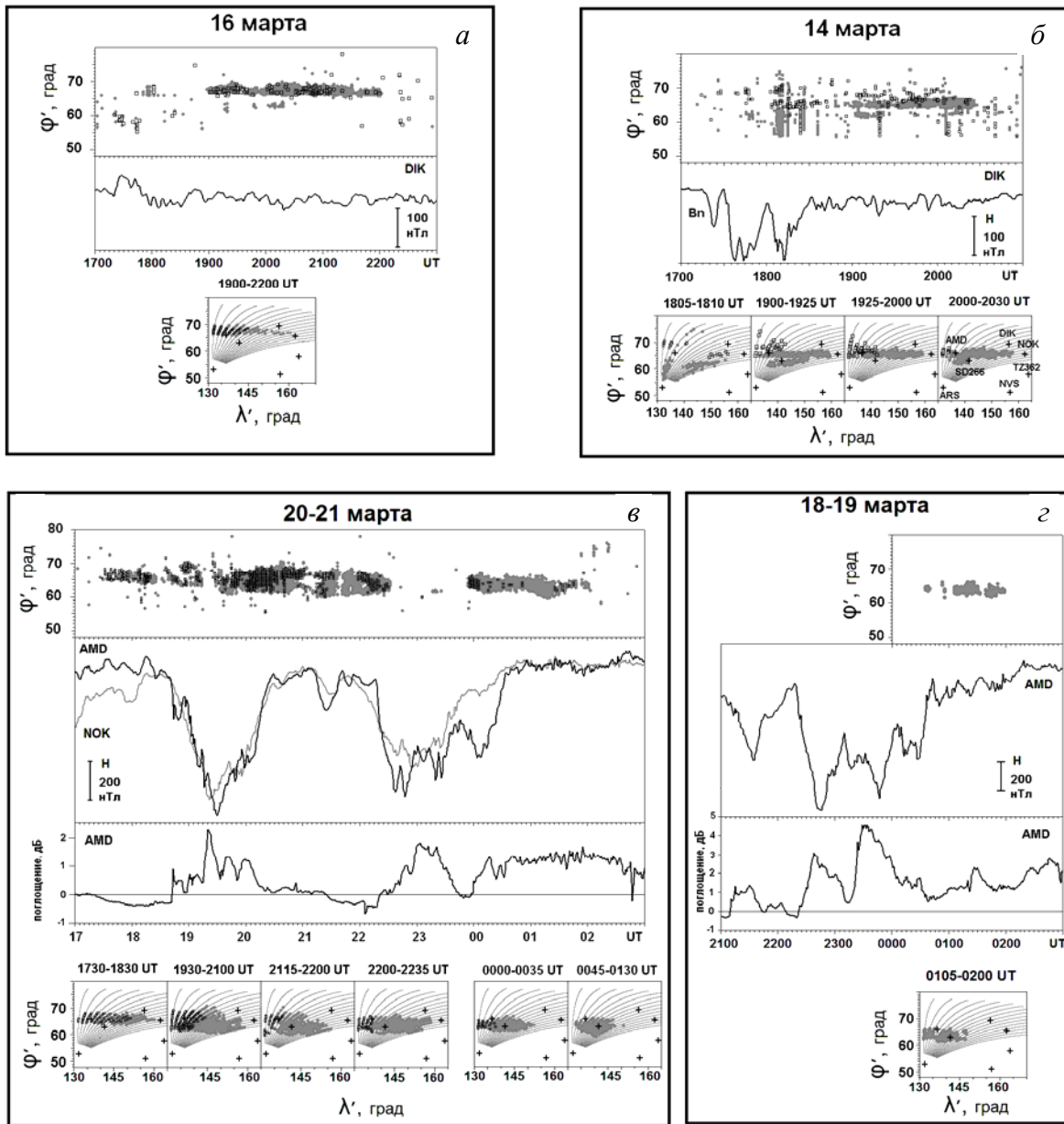


Рис. 8. Для 17:00–23:00 UT 16 марта (а), 17:00–21:00 UT 14 марта (б), 17:00–03:00 UT 20–21 марта (в) и 00:00–03:00 UT 19 марта (г) показаны вариации исправленной геомагнитной широты  $\phi'$  рассеивающих ионосферных неоднородностей,  $H$ -компоненты геомагнитного поля на одной из станций, находящихся в поле зрения радара, и карты положения точек рассеяния в исправленной геомагнитной системе координат. Для 20–21 марта показаны графики вариаций  $H$ -компоненты поля на станциях NOK (серая линия) и AMD (черная линия). Для этих же дней и для 18–19 марта приведены графики риометрического поглощения на ст. AMD. На рис. 8–10 графики  $\phi'_i$  (UT) и карты FAEDIs построены для сигналов с  $P_{1i} > 5$  дБ (нижняя квартиль значений  $P_{1i}$  за 13–14 марта); серые символы соответствуют сигналам с  $V_{Di} < 0$ , черные — с  $V_{Di} > 0$ . Над картами указаны интервалы UT, для которых они построены

В отличие от них горизонтальные структуры 7 и 5, показанные на рис. 8 в, г, наблюдались в утренние часы (04:00–09:30 MLT) после множественных усилений западного электроджета, сопровождавшихся ростом поглощения на ст. AMD. В обоих случаях в области, обследуемой радаром, поле западного электроджета было максимально на ст. AMD, над которой после уменьшения поглощения до 1 дБ были зафиксированы рассеивающие FAEDIs с  $V_{Di} < 0$ . Средняя доплеровская скорость  $\sim -90$  м/с была в 1.5–2.5 раза меньше, чем в горизонтальных структурах, наблюдавшихся в околополуночные часы.

Дискретные  $R_i$ -структуры, зафиксированные на протяжении главной, ранней и части поздней восстановительной фаз бури, значительно отличаются по пространственно-временной динамике от горизонтальных  $R_i$ -структур. Они показаны на рис. 9, б с лучшим, чем на рис. 7, а временным разрешением. На рис. 7, а и 9, б видно, что в 06:20–11:30 UT 17 марта BS $_i$ -сигналы образуют почти непрерывную серию дискретных структур уменьшающейся дальности, отмеченную на рис. 2, б и 7, а цифрой 2. В начале серии  $R_i \sim 2600$  км,  $V_{Di}$  преимущественно отрицательны; в конце  $R_i \sim 700$  км,  $V_{Di}$  в основном положительны.

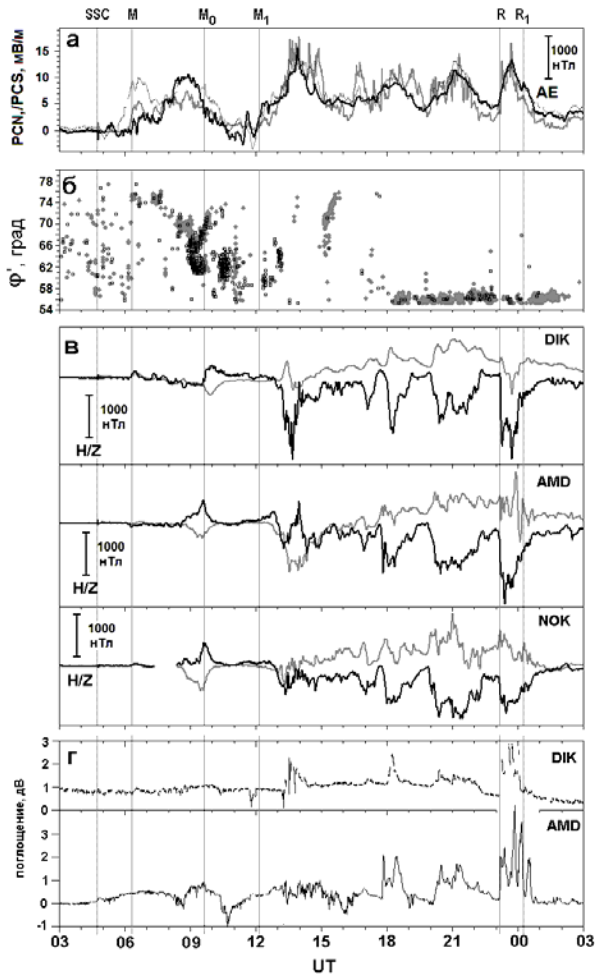


Рис. 9. Вариации  $PCN/PCS/AE$ -индексов (черная/пунктирная/серая линии) (а); исправленной геомагнитной широты FAEDIs (б);  $H/Z$ -компонент геомагнитного поля (черная/серая линии), зафиксированных в поле зрения ЕКБ-радар (в); риометрического поглощения на станциях DIK и AMD (з)

Первый элемент серии появился в начале первой ступени главной фазы на фоне увеличения, а последний — за час до начала второй ступени главной фазы на фоне уменьшения  $PCN/PCS$ - и  $AE$ -индексов. Рост/уменьшение  $PCN/PCS$ -индексов указывает на усиление/ослабление межпланетного электрического поля и, соответственно, поля магнитосферной конвекции, проявившееся в росте/уменьшении  $AE$ -индекса [Troshichev et al., 2006].

Пространственно-временная динамика областей FAEDIs, формирующих серию, показана на рис. 10 (карты 1–7). Первый элемент серии образован сигналами с  $V_{Di} \sim -600$  м/с, наблюдавшимися на 0–4 лучах и  $\phi'_i \sim 73.6\text{--}75.4^\circ$  в 10:50–12:20 MLT (карта 1). Следующий элемент, имеющий такие же характеристики, показан на карте 2. Третий элемент, наблюдавшийся в 08:00–09:00 UT на 0–7 лучах на  $5^\circ$  южнее, чем первые два, тоже был образован FAEDIs с  $V_{Di} < 0$ . На рис. 5 видно, что появление этого элемента сопровождается первым значительным понижением критической частоты F2-слоя на  $\sim 3$  МГц над Диксоном и Норильском. На карте 3 показана его часть, не перекрывающаяся по времени со следующей дискретной структурой, образованной сиг-

налами с  $V_{Di} > 0$ . Во время наблюдения третьего элемента значения  $PCN/PCS$ - и  $AE$ -индексов максимальны.

Мы полагаем, что в представленных на картах 1–3 случаях ЕКБ-радар зафиксировал FAEDIs, расположенные в горловине усиленной магнитосферной конвекции. Такие события, наблюдавшиеся вблизи полуденного меридиана на радаре SuperDARN, описаны, например, в [Fiori et al., 2009], на ЕКБ-радаре — в [Berngardt et al., 2015]. Судя по показанным на рис. 7, б вариациям  $H$ -составляющей геомагнитного поля, отрицательным в Abisko и положительным в Revek, в 06:00–09:00 UT 17 марта ЕКБ-радар действительно обследовал область ионосферы, лежащую между утренним и вечерним конвективными вихрями.

На 4 и 5 картах видны две области FAEDIs — западная с  $V_{Di} < 0$  (0–8 и 0–5 лучи в начале и в конце события соответственно) и восточная с  $V_{Di} > 0$  (8–15 лучи). Они наблюдались в послеполуденном секторе на фазе ослабления полярной ( $PCN$ -индекс) и авроральной ( $AE$ -индекс) магнитной активности и сопровождали переход поля зрения ЕКБ-радар из области горловины в сектор вечернего вихря магнитосферной конвекции. На это указывает положительная бухта в  $H$ -составляющей геомагнитного поля, отчетливо видная на всех представленных на рис. 9, в графиках.

Сравнивая вариации геомагнитного поля на станциях, видим, что до  $M_0$  положительная бухта в  $H$ -компоненте наблюдалась на NOK и AMD. Центр джета был расположен южнее этих станций ( $\Delta Z < 0$ ). После  $M_0$ , соответствующего, как указано в табл. 2, переходу к  $B_z\text{ММП} > 0$  и ослаблению поля конвекции, в Норильске и Амдерме наблюдалось уменьшение, а на Диксоне — увеличение поля восточного джета, центр которого сместился в сторону полюса и находился до конца бухты южнее Диксона. На картах видно разделение восточной области на две зоны, разнесенные на  $\Delta\phi' \sim 3^\circ$  и  $5^\circ$  (карты 4 и 5 соответственно). До момента  $M_0$  в зоне, расположенной южнее NOK и AMD, средняя  $V_{Di}$  была  $\sim 420$  м/с, а после него уменьшилась до 390 м/с. В отличие от этого в северной зоне доплеровская скорость  $BS_i$ -сигналов после  $M_0$  увеличилась от 370 до 470 м/с. Мы полагаем, что обнаруженная нами динамика FAEDIs указывает на наличие в 08:45–10:00 UT двух зон усиленного электрического поля северного направления, типичного для восточного электроджета. После смены знака  $B_z\text{ММП}$  с отрицательного на положительный меридиональная компонента  $E_c$  в южной зоне уменьшилась, а в северной увеличилась, что привело к ослаблению геомагнитных возмущений на NOK и AMD и усилению их на DIK.

На карте 6, построенной для интервала 10:15–10:45 UT, видна только область FAEDIs с низкими положительными доплеровскими скоростями  $V_{Di} \sim 70$  м/с. Соответствующие ей значения  $PCN/PCS$  и  $AE$  понижены, магнитные станции регистрируют конец восстановительной фазы положительного бухтообразного возмущения. Южная граница области FAEDIs расположена на самой низкой для данной серии широте  $\phi'_i \sim 60^\circ$ . Во время наблюдения этой

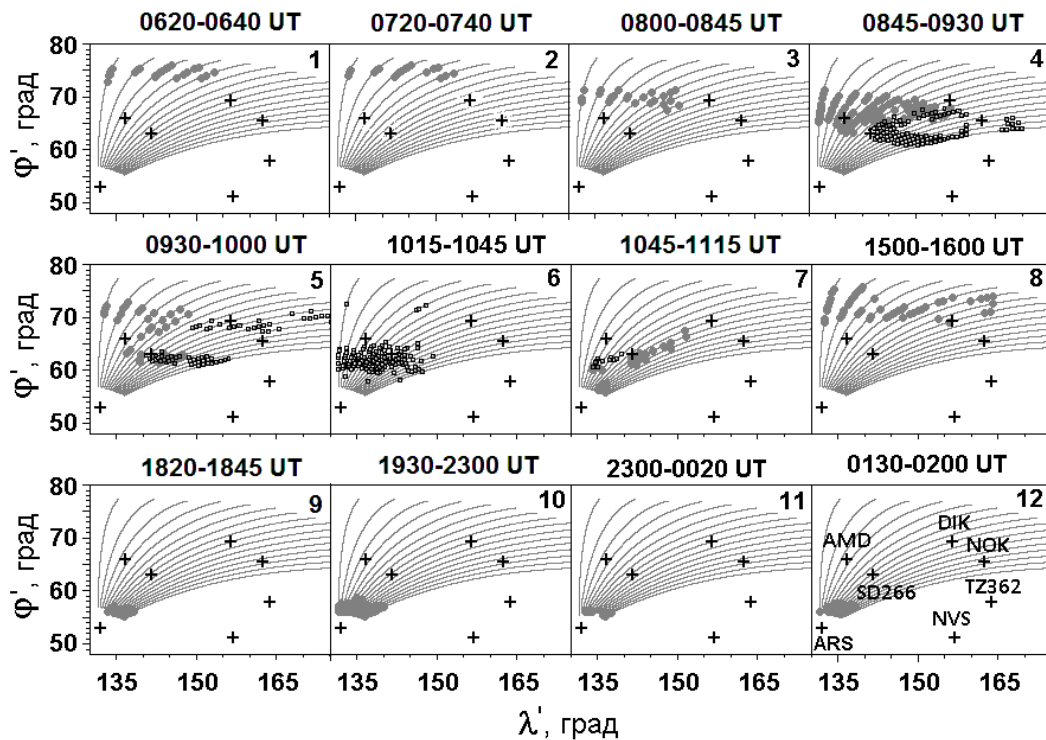


Рис. 10. Карты положения точек ионосферного рассеяния в исправленной геомагнитной системе координат, построенные для главной, ранней и части поздней восстановительной фаз геомагнитной бури Святого Патрика

структуры критическая частота F2-слоя над станциями SD266 и TZ362 уменьшилась на ~ 2 МГц, риометрическое поглощение на ст. AMD — до ~ -1 дБ (рис. 9, з).

Последовательность областей FAEDIs, смещавшихся в сторону экватора, завершается структурами, показанными на карте 7. Видны две области рассеяния с  $V_{Di} < 0$ , пересекаемые 8–10 лучами на широтах  $\phi'_i = 56–58^\circ$  и  $61–65^\circ$ . Судя по дальностям  $R_i = 400–600$  и  $1000–1600$  км, ближняя и дальняя зоны рассеяния расположены в E- и F-областях ионосферы соответственно [Berngardt et al., 2015]. Отметим, что, несмотря на отсутствие значительных геомагнитных возмущений в этом временном интервале, доплеровская скорость сигналов, рассеянных в этих областях, достигает  $-750$  м/с, что указывает на наличие в них усиленной северо-южной компоненты поля магнитосферной конвекции, характерной для западного электроджета.

В разделе 3 отмечено, что продолжительное усиление поля магнитосферной конвекции, связанное с направленной к югу  $B_z$ -ММП, вызвало после 12:07 UT 17 марта второе усиление поля кольцевого тока и множественные активизации авроральных электроджетов. Графики на рис. 9, в показывают, что в это же время усилились отрицательные геомагнитные возмущения, наблюдавшиеся в секторе обзора ЕКБ-радаров. При этом только одно из них, зафиксированное в раннюю восстановительную фазу бури, сопровождалось положительными бухтами в H-компоненте поля на среднеширотных станциях NVS и ARS. Следовательно, все эти события, за исключением наблюдавшегося в раннюю фазу восстановления, не являются классическими суббуриями. В англо-

язычных статьях такие возмущения называются sub-storm-like event (SLE, подобное суббуре событие).

Судя по времени перехода от отрицательных к положительным возмущениям Z-компоненты геомагнитного поля, станция DIK находилась севернее центра западного джета после 13:00 UT, а станции NOK и AMD — после 15:00 UT 17 марта. Сопоставление рис. 9, в, з показывает, что на станциях DIK и AMD события SLE сопровождалось ростом риометрического поглощения. Отсюда следует, что уменьшение числа BS<sub>ig</sub>-сигналов на фазе второго уменьшения SYM-H-индекса могло быть связано с корпускулярной ионизацией, вызвавшей рост поглощения радиоволн в D- и E-областях ионосферы.

После 15:00 UT на графике  $\phi'_i(UT)$  вновь появляются дискретные структуры, отмеченные на рис. 2, б и 7, а цифрами 3 и 4. В первой из них широта точек рассеяния со временем увеличивается от  $70$  до  $75^\circ$ , во второй почти не меняется в течение 8 ч. На ионограммах станций NO369, SD266 и TZ362 этим двум структурам соответствуют только отражения от спорадических E-слоев. На ст. DI373 во время наблюдения 3 и 4 дискретных структур эпизодически наблюдался F2-слой с  $f_oF2$ , соответственно, на 1 МГц большей и в 2 раза меньшей, чем фоновая.

Структура с увеличивающейся широтой, отмеченная на рис. 2, 7 цифрой 3, наблюдалась после завершения SLE, совпадающего по времени с пиком AE-индекса (см. рис. 2 и табл. 2). На ст. DIK глубина бухты, соответствующей SLE, была ~ -2000 нТл. Во время наблюдения структуры геомагнитное поле на станциях DIK, NOK, AMD, а также TIK (см. рис. 11),

находившейся вблизи полуночного меридиана, было относительно спокойным. Однако ст. УАК, широта которой на  $9\text{--}13^\circ$  меньше широты указанных выше станций, зарегистрировала мощное ( $\Delta H \sim -1600$  нТл) возмущение западного электроджета, расположенного южнее нее ( $\Delta Z > 0$ ). На рис. 3 из работы [Jacobsen, Andalsvik, 2016] показано, что в это же время в секторе  $20\text{--}24^\circ$  Е восточный электроджет сместился до широты, меньшей, чем  $59^\circ$  N ( $\varphi' \sim 55^\circ$ ). В работе [Соловьев и др., 2009] показано, что во время сильных магнитных бурь восточный и западный электроджеты одновременно смещаются в низкие широты. Учитывая это, мы полагаем, что бухтообразное усиление западного электроджета не было зафиксировано в секторе обзора ЕКБ-радаров из-за отсутствия в нем магнитных станций, расположенных на широтах  $\varphi' = 51\text{--}65^\circ$  (см. табл. 1).

Положение FAEDIs, соответствующих структуре 3, показано на карте 8. Видно, что все точки рассеяния расположены выше наземных наблюдательных пунктов на широтах  $\varphi' = 70\text{--}75^\circ$ . Максимальные для этой структуры скорости  $V_{Di} \sim (450\text{--}750)$  м/с, наблюдались только на 0–5 лучах и только в начале события. Появление FAEDIs в этом случае могло быть связано с перестройкой вечернего вихря магнитосферной конвекции, последовавшей за изменением знака  $B_z$  ММП (см. рис. 3). Сравнивая карту 8 с картами продольных токов, приведенными на рис. 5 в работе [Le et al., 2016], видим, что в этом случае в секторе обзора ЕКБ-радаров область рассеивающих FAEDIs находилась севернее продольных токов зоны 1, т. е. в полярной шапке. Изображение фрагмента аврорального овала, приведенное в этой же работе на рис. 3, g, позволило нам определить, что в 16:19 UT на долготах  $60\text{--}65^\circ$  Е (в западной части поля зрения ЕКБ-радаров) овал находился на широтах  $53\text{--}70^\circ$  N. Учитывая тенденцию смещения овала на минимальные широты в окрестности полуночи, мы полагаем, что его экваториальная граница находилась на широтах, меньших  $53^\circ$  N во всем долготном секторе, обследуемом радаром. Естественно предположить, что  $BS_i$ -сигналы, сформировавшие дискретную структуру 3 и распространившиеся по траекториям с малыми углами места,

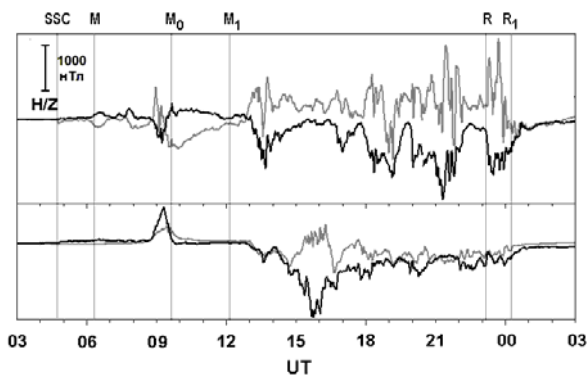


Рис. 11. Вариации  $H/Z$ -компонент геомагнитного поля в показанном на рис. 9 временном интервале, зафиксированные в  $\sim 30^\circ$  к востоку от поля зрения ЕКБ-радаров магнитными обсерваториями ТК (вверху) и УАК (внизу)

прошли до FAEDIs и обратно под мощными поглощающими спорадическими  $E$ -слоями, наблюдавшимися в 15:00–16:00 UT на всех, кроме DI373, станциях.

В 18:17 UT на ст. DIK было зафиксировано следующее событие SLE глубиной  $\sim -1350$  нТл. Начиная с этого момента и до 02:20 UT 18 марта на графике  $\varphi'_i(UT)$  видны только сигналы с  $V_{Di} < 0$ , приходящие с  $\varphi' = 55.2\text{--}58.9^\circ$ , что соответствует дальностям 400–600 км и токам, текущим в  $E$ -слое ионосферы [Berngardt et al., 2015]. Пространственно-временная динамика этой структуры, отмеченной на рис. 2, б и 7, а цифрой 4, показана на картах 9–12 на рис. 10. Сопоставление характеристик входящих в нее  $BS_i$ -сигналов с вариациями геомагнитного поля и риометрического поглощения показывает, что число рассеянных сигналов уменьшалось во время пиков поглощения, сопровождавших усиления поля западного электроджета, аналогично тому, как это было в случаях горизонтальных структур, рассмотренных в разделе 4. На рис. 3 работы [Jacobsen, Andalsvik, 2015], построенном для меридианов  $20\text{--}24^\circ$  Е видно, что в 20:00–23:30 UT центр западного джета находился ниже широты  $59^\circ$  N ( $\varphi' < 55^\circ$ ).

## 6. РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы провели поиск эффектов сильной геомагнитной бури Святого Патрика в характеристиках сигналов обратного рассеяния, наблюдавшихся ЕКБ-радаром, и сопоставили эти эффекты с возмущениями ионосферы, геомагнитного поля, риометрического поглощения и полного электронного содержания в его поле зрения. Перечислим основные результаты проведенного нами исследования.

- Начальная фаза бури, развивавшаяся во время воздействия на магнитосферу области сжатого солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, сопровождалась только увеличением количества сигналов, обратно рассеянных неоднородностями земли ( $BS_g$ -сигналов). Слабая реакция магнитосферно-ионосферной системы на увеличение лобового давления солнечного ветра от  $\sim 8$  до 18 нПа объясняется тем, что в течение 8 предшествующих дней низкой геомагнитной активности магнитосфера пришла в стабильное по отношению к внешним воздействиям состояние [Bargatze et al., 1985; Sharma et al., 2005].

- На первой ступени главной фазы индекс  $SYM-H$  уменьшился до  $-101$  при  $B_z \text{ ММП} < 0$ , а затем увеличился до  $-38$  нТл при  $B_z \text{ ММП} > 0$ . В данных ЕКБ-радаров обнаружены волнообразные понижения минимальной дальности  $BS_g$ -сигналов и серия сигналов уменьшающейся дальности, рассеянных в ионосфере ( $BS_i$ -сигналов). На этапе усиления кольцевого тока уменьшения дальности  $BS_g$ -сигналов, которые могли быть вызваны перемещающимися ионосферными неоднородностями, совпали по времени с усилениями авроральной активности, на этапе ослабления — с ростом лобового давления солнечного ветра. Серия  $BS_i$ -сигналов уменьшающейся дальности сопровождала процесс расширения токовой системы магнитосферной конвекции в сторону экватора и переход поля зрения ЕКБ-радаров из сектора горловины в сектор вечернего вихря конвекции.

- На второй ступени главной фазы индекс  $SYM-H$  немонотонно уменьшился до  $-234$  нТл. Поле зрения ЕКБ-радаров перешло в сектор западного электроджета. Высокие значения  $f_oE_s$ , флуктуации ПЭС и риометрического поглощения показывают, что все наблюдательные инструменты находились в зоне авроральных высыпаний. Это подтверждается результатами работ [Jacobsen, Andalsvik, 2016; Le et al., 2016].

Поле конвекции достигло максимальных для данной бури значений  $\sim 1.4$  мВ/м в 13:00–15:00 UT и оставалось на уровне  $E_c \leq 0.6$  мВ/м до конца ранней восстановительной фазы бури. Несмотря на это, в 15:00–16:30 UT авроральные станции зафиксировали уменьшение  $AE$ -индекса от 1700 до 700 нТл, а станции, находящиеся в поле зрения радаров, — отсутствие существенных возмущений геомагнитного поля, что объясняется значительным смещением западного электроджета в сторону экватора. В этом временном интервале на ст. УАК ( $\varphi' \sim 57^\circ$ ) наблюдалось мощное усиление западного электроджета, а в данных ЕКБ-радаров — дискретная структура, образованная  $BS_i$ -сигналами, прошедшими под поглощающими спорадическими  $E$ -слоями и рассеянными в полярной шапке.

Дальнейшее расширение зоны высыпаний и западного электроджета в сторону экватора привело к исчезновению  $BS_g$ - и  $BS_i$ -сигналов. Последние вновь появились после начала множественных усилений поля западного электроджета в поле зрения ЕКБ-радаров, совпадающих по времени с увеличениями  $AE$ ,  $PCN/PCS$ -индексов.  $BS_i$ -сигналы наблюдались в течение 8 ч в конце второй ступени главной фазы, в раннюю и первые два часа поздней восстановительной фазы. Сигналы были рассеяны в  $E$ -области ионосферы и имели направленные на восток доплеровские скорости, что указывает на их связь с плазменными процессами, развивающимися в области западного электроджета.

- Дискретные горизонтальные  $BS_i$ -структуры в предшествующие буре дни и в позднюю восстановительную фазу бури наблюдались в ограниченном диапазоне широт и не выходили за пределы  $\varphi' = 60$ – $70^\circ$ . В рассмотренные нами дни они были зарегистрированы в окрестности полудня в горловине конвекции, в окрестности полуночи — в разрыве Харанга и в утренние часы — в зоне западного электроджета. Ширина зоны FAEDIs, создающих эти структуры, увеличивалась с ростом геомагнитной возмущенности за счет уменьшения широты ее южной границы.

- Во всех рассмотренных случаях число  $BS_i$ -сигналов, образующих дискретные структуры, уменьшалось вплоть до их полного исчезновения во время SLEs, сопровождавшихся увеличением риометрического поглощения.

- Уменьшение событий  $BS_g$  в главную и раннюю восстановительную фазы бури Святого Патрика было связано с поглощением, уровень которого в нижней ионосфере увеличился за счет ионизации атмосферы высыпавшимися авроральными частицами. В позднюю восстановительную фазу бури

число  $BS_g$ -сигналов уменьшилось из-за изменения состава нейтральной атмосферы. Этот вывод следует из анализа данных по ПЭС и подтверждается результатами анализа отношения  $[O]/[N_2]$ , проведенного для этой бури в работе [Astafyeva et al., 2015].

Работа выполнена в рамках гранта № НШ-6894.2016.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ и при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ №14-05-00588.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белецкий А.Б., Михалев А.В., Ташилин М.А. и др. Оптические наблюдения среднеширотного излучения верхней атмосферы во время магнитной бури 17 марта 2015 г. // Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД-2015): Тезисы докладов. Санкт-Петербург, 23–26 июня 2015. Санкт-Петербург, 2015. С. 294.

Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.

Иевенко И.Б., Алексеев В.Н. Влияние суббури и бури на динамику SAR-дуги. Статистический анализ // Геомагнетизм и аэронавигация. 2004. Т. 4, № 5. С. 643–654.

Тертышников А.В. Эффект магнитной бури 17.03.2015 г. в полном электронном содержании ионосферы над Эльбрусом // Гелиогеофизические иссл. 2015. Вып. 12. С. 29–33.

Подлесный С.В., Михалев А.В. Спектрофотометрия среднеширотных сияний, наблюдаемых в регионе Восточной Сибири во время магнитных бурь 27 февраля 2014 г. и 17 марта 2015 г. // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды XIV конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, 2015. С. 175–177.

Полех Н.М., Золотухина Н.А., Романова Е.Б. и др. Ионосферные эффекты магнитосферных и термосферных возмущений 17–19 марта 2015 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2016. Т. 56, № 5. С. 557–571.

Соловьев С.И., Борова Р.И., Моисеев А.В. и др. Динамика ионосферных электрических токов и границ аврорального свечения в периоды сильных магнитных бурь // Геомагнетизм и аэронавигация. 2009. Т. 49, № 4. С. 472–482.

Astafyeva E., Zakharenkova I., Förster M. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview // J. Geophys. Res. 2015. V. 120. P. 9023–9037. DOI: 10.1002/2015JA021629.

Baker K.B., Wing, S. A new magnetic coordinate system for conjugate studies at high latitudes // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P. 9139–9143.

Bargatze L.F., Baker D.N., McPherron R.L., Hones E.W.Jr. Magnetospheric impulse response for many levels of geomagnetic activity // J. Geophys. Res. 1985. V. 90, N A7. P. 6387–6394.

Berngardt O.I. Zolotukhina N.A., Oinats A.V. Observations of field-aligned ionospheric irregularities during quiet and disturbed conditions with EKB radar: First results // Earth, Planets and Space. 2015. 67:143. DOI: 10.1186/s40623-015-0302-3.

Blagoveshchensky D.V., Maltseva O.A., Anishin M.M., et al. Impact of the magnetic superstorm on March 17–19, 2015 on subpolar HF radio paths: Experiment and modeling // Adv. Space Res. 2016. V. 58. P. 835–846.

Blanchard G.T., Sundeen S., Baker K.B. Probabilistic identification of high-frequency radar backscatter from the ground and ionosphere based on spectral characteristics // Radio Sci. 2009. V. 44. RS5012. DOI: 10.1029/2009RS004141.

Bland E.C., McDonald A.J., De Larquier S., Devlin J.C. Determination of ionospheric parameters in real time using



- SuperDARN HF Radars // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. P. 5830–5846. DOI: 10.1002/2014JA020076.
- Buonsanto M.J. Ionospheric storms – a review // *Space Sci. Rev.* 1999. V. 88. P. 563–601.
- Burke W.J., Huang C.Y., Marcos F.A., Wise J.O. Interplanetary control of thermospheric densities during large magnetic storms // *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2007. V. 69, N 3. P. 279–287.
- Cherniak I., Zakharenkova I. Dependence of the high-latitude plasma irregularities on the auroral activity indices: A case study of 17 March 2015 geomagnetic storm // *Earth, Planets and Space.* 2015. 67:151. DOI: 10.1186/s40623-015-0316-x.
- Dasso S., Gomez D., Mandrini C.H. Ring current decay rates of magnetic storms: A statistical study from 1957 to 1998 // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N A5. DOI: 10.1029/2000JA000430.
- Davies J.A., Lester M., Milan S.E., Yeoman T.K. A comparison of velocity measurements from the CUTLASS Finland radar and the EISCAT UHF system // *Ann. Geophysicae.* 1999. V. 17. P. 892–902.
- Ericsson S., Ergun R.E., Carlson C.W., Peria W. The cross-polar potential drop and its correlation to the solar wind // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105, N 8. P. 18,639–18,654.
- Fiori R.A.D., Koustov A.V., Boteler D., Makarevich R.A. PCN magnetic index and average convection velocity in the polar cap inferred from SuperDARN radar measurements // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114, N A7. DOI: 10.1029/2008JA013964.
- Goodman J.M. *Space Weather & Telecommunications.* Springer. New York, 2005. 382 p.
- Jacobsen K.S., Andalsvik Y. L. Overview of the 2015 St. Patrick's Day storm and its consequences for RTK and PPP positioning in Norway // *J. Space Weather Space Clim.* 2016. V. 6, N A9. DOI: 10.1051/swsc/2016004.
- Kamide Y., Yokoyama N., Gonzalez W.D., et al. Two-step development of geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103, N A4. P. 6917–6921.
- Kamide Y., Kusano K. No major solar flares but the largest geomagnetic storm in the present solar cycle // *Space Weather.* 2015. V. 13. P. 365–367. DOI: 10.1002/2015SW001213.
- King J.H. Solar wind parameters and magnetospheric coupling studies. *Solar Wind – Magnetospheric Coupling* / Eds. Y. Kamide, J.A. Slavin. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 1986. P. 163–177.
- Le G., Lühr H., Anderson B.J., Strangeway R.J., et al. Magnetopause erosion during the March 17, 2015 magnetic storm: Combined field-aligned currents, auroral oval, and magnetopause observations. 2016. DOI: 10.1002/2016GL068257. (available at <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2016GL068257/full>)
- Liu J., Wang W., Burns A., et al. Profiles of ionospheric storm-enhanced density during the 17 March 2015 great storm // *J. Geophys. Res.* 2016. V. 121. P. 727–744. DOI: 10.1002/2015JA021832.
- Mager P.N., Bergardt O.I., Klimushkin D.Yu., et al. First results of the high-resolution multibeam ULF wave experiment at the Ekaterinburg SuperDARN radar: Ionospheric signatures of coupled poloidal Alfvén and drift-compressional modes // *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2015. V. 130–131. P. 112–126.
- Makarevich R.A., Kellerman A.C., Bogdanova Y.V., Koustov A.V. Time evolution of the subauroral electric fields: A case study during a sequence of two substorms // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114, A04312. DOI: 10.1029/2008JA013944.
- Mendillo M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content // *Rev. Geophys.* 2006. V. 44, RG4001. DOI: 10.1029/2005RG000193.
- Milan S.E., Lester M. Spectral populations in HF radar backscatter from the E region auroral electrojets // *Ann. Geophys.* 2001. V. 19. P. 189–204.
- Oinats A.V., Kurkin V.I., Nishitani N. Statistical study of medium-scale traveling ionospheric disturbances using SuperDARN Hokkaido ground backscatter data for 2011 // *Earth, Planets and Space.* 2015. V. 67:22. DOI: 10.1186/s40623-015-0192-4.
- Pokhotelov D., Mitchell C.N., Spencer P.S.J., et al. Ionospheric storm time dynamics as seen by GPS tomography and in situ spacecraft observations // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113, A00A16. DOI:10.1029/2008JA013109.
- Ponomarchuk S.N., Polekh N.M., Romanova E.B., et al. The disturbances of ionospheric radio channel during magnetic storm on March 17–19, 2015 // *Proc. SPIE.* 2015. 9680, 96805H. DOI: 10.1117/12.2203593.
- Ponomarenko P.V., Waters C.L. Spectral width of SuperDARN echoes: Measurement, use and physical interpretation // *Ann. Geophys.* 2006. V. 24, N 1. P. 115–128. DOI: 10.5194/angeo-24-115-2006.
- Ribeiro A.J., Ruohoniemi J.M., Baker J.B.H., et al. A new approach for identifying ionospheric backscatter in midlatitude SuperDARN HF radar observations // *Radio Sci.* 2011. V. 46, RS4011. DOI: 10.1029/2011RS004676.
- Sharma A.S., Baker D.N., Borovsky J.E. Nonequilibrium Phenomena in the Magnetosphere: Phase Transition, Self-organized Criticality and Turbulence // *Nonequilibrium Phenomena in Plasmas* / Eds. A. S. Sharma, P.K. Kaw. Springer, 2005. P. 3–22.
- Spasojevic M., Fuselier S.A. Temporal evolution of proton precipitation associated with the plasmaspheric plume // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114, A12201. DOI: 10.1029/2009JA014530.
- Troshichev O.A., Janzhura A., Stauning P. Unified PCN and PCS indices: Method of calculation, physical sense, and dependence on the IMF azimuthal and northward components // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111, A05208. DOI: 10.1029/2005JA011402.
- Verhulst T., Sapundjiev D., Stankov S. The need for local, high resolution, multi instrument monitoring to study complex effects of space weather disturbances: A study of the events in February 2014 // 40th COSPAR Scientific Assembly 2014: Abstracts. Moscow, 2014. C1.3-0018-14.pdf.  
URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov> (дата обращения 9 сентября 2016).
- URL: <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 9 сентября 2016).
- URL: <http://www.intermagnet.org/index-eng>. Php (дата обращения 14 сентября 2016).
- URL: <http://geo-phys.aari.ru/interface2.html> (дата обращения 9 сентября 2016).
- URL: <http://space-weather.ru/index.php?page=iono-grammy> (дата обращения 23 сентября 2016).
- URL: [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm\\_vitmo.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm_vitmo.html) (дата обращения 12 сентября 2016).
- URL: [www.solen.info/solar/old\\_reports](http://www.solen.info/solar/old_reports) (дата обращения 12 сентября 2016).
- URL: <http://guvi.jhuapl.edu/site/data/guvi-dataproducts.shtml> (дата обращения 12 сентября 2016).

## REFERENCES

- Astafyeva E., Zakharenkova I., Förster M. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview. *J. Geophys. Res.* 2015, vol. 120, pp. 9023–9037. DOI: 10.1002/2015JA021629.
- Baker K.B., Wing, S. A new magnetic coordinate system for conjugate studies at high latitudes. *J. Geophys. Res.* 1989, vol. 94, pp. 9139–9143.
- Bargatze L.F., Baker D.N., McPherron R.L., Hones E.W.Jr. Magnetospheric Impulse Response for Many Levels of Geomagnetic Activity. *J. Geophys. Res.* 1985, vol. 90, no. A7, pp. 6387–6394.

Beletskiy A.B., Mikhalev A.V., Tashchilin M.A. et al. Optical observations of midlatitude upper atmosphere radiation during magnetic storms March 17, 2015. *Mezhdunarodnyi simpozium "Atmosfernaya radiatsiya i dinamika" (MSARD – 2015)*. 23–26 iyunya 2015, Sankt-Peterburg-Petrodvorets [International Symposium "Atmospheric radiation and dynamics" (MSARD – 2015)]. 23–26 June 2015, St. Petersburg, Peterhof. Abstracts. St. Petersburg, 2015, p. 294. (In Russian).

Berngardt O.I., Zolotukhina N.A., Oinats A.V. Observations of field-aligned ionospheric irregularities during quiet and disturbed conditions with EKB radar: First results. *Earth, Planets and Space*. 2015, 67:143. DOI: 10.1186/s40623-015-0302-3.

Blagoveshchensky D.V., Maltseva O.A., Anishin M.M., Sergeeva M.A., Rogov D.D. Impact of the magnetic superstorm on March 17–19, 2015 on subpolar HF radio paths: Experiment and modeling. *Adv. Space Res.* 2016, vol. 58, pp. 835–846.

Blanchard G.T., Sundeen S., Baker K.B. Probabilistic identification of high-frequency radar backscatter from the ground and ionosphere based on spectral characteristics. *Radio Sci.* 2009, vol. 44, RS5012. DOI: 10.1029/2009RS004141.

Bland E.C., McDonald A.J., De Larquier S., Devlin J.C. Determination of ionospheric parameters in real time using SuperDARN HF Radars. *J. Geophys. Res.* 2014, vol. 119, pp. 5830–5846. DOI: 10.1002/2014JA020076.

Bryunelli B.E., Namgaladze A.A. *Fizika ionosfery* [Physics of the ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 528 p. (In Russian).

Buonsanto M.J. Ionospheric storms – a review. *Space Sci. Rev.* 1999, vol. 88, pp. 563–601.

Burke W.J., Huang C.Y., Marcos F.A., Wise J.O. Interplanetary control of thermospheric densities during large magnetic storms. *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2007, vol. 69, no. 3, pp. 279–287.

Cherniak I., Zakharenkova I. Dependence of the high-latitude plasma irregularities on the auroral activity indices: a case study of 17 March 2015 geomagnetic storm. *Earth, Planets and Space*. 2015, 67:151. DOI: 10.1186/s40623-015-0316-x.

Dasso S., Gomez D., Mandrini C.H. Ring current decay rates of magnetic storms: A statistical study from 1957 to 1998. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, no. A5. DOI: 10.1029/2000JA000430.

Davies J.A., Lester M., Milan S.E., Yeoman T.K. A comparison of velocity measurements from the CUTLASS Finland radar and the EISCAT UHF system. *Ann. Geophysicae*. 1999, vol. 17, pp. 892–902.

Ericsson S., Ergun R.E., Carlson C.W., Peria W. The cross-polar potential drop and its correlation to the solar wind. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, no. 8, pp.18,639–18,654.

Fiori R.A.D., Koustov A.V., Boteler D., Makarevich R.A. PCN magnetic index and average convection velocity in the polar cap inferred from SuperDARN radar measurements. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, no. A07225. DOI: 10.1029/2008JA013964.

Goodman J.M. *Space Weather & Telecommunications*. Springer. New York, 2005, 382 p.

Ievenko I.B., Alekseev V.N. Substorm and storm effect on SAR-arc dynamics. Statistical analysis. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2004, vol. 4, no. 5, pp. 643–654. (In Russian).

Jacobsen K.S., Andalsvik Y.L. Overview of the 2015 St. Patrick's day storm and its consequences for RTK and PPP positioning in Norway. *J. Space Weather Space Clim.* 2016, vol. 6, no. A9. DOI: 10.1051/swsc/2016004.

Kamide Y., Yokoyama N., Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Daglis I.A., Brekke A., Masuda S. Two-step development of geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 1998, vol. 103, no. A4, pp. 6917–6921.

Kamide Y., Kusano K. No Major Solar Flares but the Largest Geomagnetic Storm in the Present Solar Cycle. *Space Weather*. 2015, vol. 13, pp. 365–367. DOI: 10.1002/2015SW001213.

King J.H. Solar wind parameters and magnetospheric coupling studies. *SolarWind-Magnetospheric Coupling* / Eds. Y. Kamide, J.A. Slavin. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 1986, pp. 163–177.

Le G., Lühr H., Anderson B.J., Strangeway R.J., Russell C.T., Singer H., Slavin J.A., Zhang Y., Huang T., Bromund K., Chi P.J., Lu G., Fischer D., Kepko E.L., Leinweber H.K., Magnes W., Nakamura R., Plaschke F., Park J., Rauberg J. Magnetopause erosion during the March 17, 2015, magnetic storm: Combined field-aligned currents, auroral oval, and magnetopause observations. 2016. DOI: 10.1002/2016GL068257. Available at <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2016GL068257/full>.

Liu J., Wang W., Burns A., Yue X., Zhang S., Zhang Y. Profiles of ionospheric storm-enhanced density during the 17 March 2015 great storm. *J. Geophys. Res.* 2016, vol. 121, pp. 727–744. DOI: 10.1002/2015JA021832.

Mager P.N., Berngardt O.I., Klimushkin D.Yu., Zolotukhina N.A., Mager O.V. First results of the high-resolution multibeam ULF wave experiment at the Ekaterinburg SuperDARN radar: Ionospheric signatures of coupled poloidal Alfvén and drift-compressional modes. *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2015, vol. 130–131, pp. 112–126.

Makarevich R.A., Kellerman A.C., Bogdanova Y.V., Koustov A.V. Time evolution of the subauroral electric fields: a case study during a sequence of two substorms. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, A04312. DOI: 10.1029/2008JA013944.

Mendillo M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. *Rev. Geophys.* 2006, vol. 44, RG4001. DOI: 10.1029/2005RG000193.

Milan S. E., Lester M. Spectral populations in HF radar backscatter from the E region auroral electrojets. *Ann. Geophys.* 2001, vol. 19, pp. 189–204

Oinats A.V., Kurkin V.I., Nishitani N. Statistical study of medium-scale traveling ionospheric disturbances using SuperDARN Hokkaido ground backscatter data for 2011. *Earth, Planets and Space*. 2015, vol. 67:22. DOI: 10.1186/s40623-015-0192-4.

Podlesnyy S.V., Mikhalev A.V. Spectrophotometry of mid-latitude auroras in Eastern Siberia during February 27, 2014 and March 17, 2015 magnetic storms. *Mezhdunarodnaya Baykal'skaya molodezhnaya nauchnaya shkola po fundamental'noy fizike. Trudy XIV konferentsii molodykh uchenykh "Vzaimodeystvie poley i izlucheni s veshchestvom"* [Baikal Young Scientists' International School on Fundamental Physics. Proc. XIV Young Scientists Conference "Interaction of Fields and Radiation with Matter"]. Irkutsk, 2015, pp. 175–177. (In Russian).

Pokhotelov D., Mitchell C.N., Spencer P.S.J., et al. Ionospheric storm time dynamics as seen by GPS tomography and in situ spacecraft observations. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, A00A16. DOI: 10.1029/2008JA013109.

Polekh N.M., Zolotukhina N.A., Romanova E.B., Ponomarchuk S.N., Kurkin V.I., Podlesnyy A.V. Ionospheric effects of magnetospheric and atmospheric disturbances on March 17–19, 2015. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and aeronomy]. 2016, vol. 56, no. 5, pp. 557–571. (In Russian).

Ponomarchuk S.N., Polekh N.M., Romanova E.B., Zolotukhina N.A., Kurkin V.I., Podlesnyy A.V. The disturbances of ionospheric radio channel during magnetic storm on March 17–19, 2015. *Proc. SPIE*. 2015, 9680, 96805H. DOI: 10.1117/12.2203593.

Ponomarenko P.V., Waters C.L. Spectral width of SuperDARN echoes: measurement, use and physical interpretation. *Ann. Geophys.* 2006, vol. 24, no. 1, pp. 115–128. DOI: 10.5194/angeo-24-115-2006.

Ribeiro A.J., Ruohoniemi J.M., Baker J.B.H., Clausen L.B.N., Larquier S. de, Greenwald R.A. A new approach for identifying ionospheric backscatter in midlatitude SuperDARN HF radar observations. *Radio Sci.* 2011, vol. 46, RS4011. DOI: 10.1029/2011RS004676.

Sharma A.S., Baker D.N., Borovsky J.E. Nonequilibrium Phenomena in the Magnetosphere: Phase Transition, Self-organized Criticality and Turbulence. *Nonequilibrium Phenomena in Plasmas* / Eds. A.S. Sharma, P.K. Kaw. Springer, 2005, pp. 3–22.

Solovyev S.I., Borojev R.I., Moiseev A.V., Du A., Yumoto K. Dynamics of the ionospheric electric currents, and auroral emission boundaries during strong magnetic storms. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2009, vol. 49, no. 4, pp. 472–482. (In Russian).

Spasojevic M., Fuselier S.A. Temporal evolution of proton precipitation associated with the plasmaspheric plume. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, no. A12201. DOI: 10.1029/2009JA014530.

Tertyshnikov A.V. Effect of magnetic storm of 17.03.2015 in the total electron content of the ionosphere above Elbrus. *Geliogeofizicheskie issledovaniya* [Heliogeophysical Research]. 2015, vol. 12, pp. 29–33. (In Russian).

Troshichev O.A., Janzhura A., Stauning P. Unified PCN and PCS indices: Method of calculation, physical sense, and dependence on the IMF azimuthal and northward components. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, A05208. DOI: 10.1029/2005JA011402.

Verhulst T., Sapundjiev D., Stankov S. The need for local, high resolution, multi instrument monitoring to study complex effects of space weather disturbances: a study of the events in February 2014. *40th COSPAR Scientific Assembly 2014. Abstracts.* Moscow, 2014, C1.3-0018-14.pdf.

URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov> (accessed September 9, 2016).

URL: <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov> (accessed September 9, 2016).

URL: <http://www.intermagnet.org/index-eng.Php> (accessed September 14, 2016).

URL: <http://geo-phys.aari.ru/interface2.html> (accessed September 9, 2016).

URL: <http://space-weather.ru/index.php?page=iono-grammy> (accessed September 23, 2016).

URL: [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm\\_vitmo.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm_vitmo.html) (accessed September 12, 2016).

URL: [www.solen.info/solar/old\\_reports](http://www.solen.info/solar/old_reports) (accessed September 12, 2016).

URL: <http://guvi.jhuapl.edu/site/data/guvi-dataproducts.shtml> (accessed September 12, 2016).