

---

## ИОНОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ НАД ВОСТОЧНОЙ АЗИЕЙ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНЫХ ДЕКАБРЬСКИХ МАГНИТНЫХ БУРЬ 2006 И 2015 гг.: СХОДСТВО И РАЗЛИЧИЕ

---

### IONOSPHERIC DISTURBANCES OVER EAST ASIA DURING INTENSE DECEMBER MAGNETIC STORMS OF 2006 AND 2015: SIMILARITIES AND DIFFERENCES

---

**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. Полех**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, polekh@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*

---

**Аннотация.** По данным ионозондов, расположенных в Восточной Азии, и картам полного электронного содержания проведен сравнительный анализ ионосферных возмущений, сопровождавших сильные геомагнитные бури 14–16 декабря 2006 г. и 19–22 декабря 2015 г. Бури имели близкие интенсивности ( $Dst_{min} = -162$  и  $-155$  нТл), но разные продолжительности главных фаз (2.5 и 19 ч). В начале обеих бурь исследуемая нами область находилась в окрестности полуночного меридиана. Отклики ионосферы на магнитные бури различались: 1) ростом критической частоты F2-слоя ионосферы на субавроральных широтах, вызванным активизацией авроральных высыпаний, в начальную фазу первой бури и отсутствием этого эффекта во время второй бури; 2) резким спадом критической частоты в вечерние часы главной фазы второй бури, связанным со смещением главного ионосферного провала на меньшие широты, и отсутствием этого эффекта во время первой бури; 3) кратковременным положительным возмущением, наблюдавшимся в субавроральных широтах только в раннюю восстановительную фазу первой бури после отрицательного ионосферного возмущения. В течение обеих бурь в средних широтах наблюдались положительные возмущения и волнообразные флуктуации критической частоты, усилившиеся в окрестности утреннего меридиана. Показано, что главными причинами различий между двумя ионосферными бурями являются различия между начальными состояниями магнитосферно-ионосферной системы и продолжительностями главных фаз магнитных бурь.

**Ключевые слова:** сильные магнитные бури, межпланетные драйверы, эффекты зимних ионосферных бурь.

**Abstract.** Using data from ionosondes, located in East Asia, and total electron content maps, we have made a comparative analysis of ionospheric disturbances associated with the intense geomagnetic storms of December 14–16, 2006 and December 19–22, 2015. These storms had almost equal peak intensities ( $Dst_{min} = -162$  and  $-155$  nT), but different durations of the main phases (2.5 and 19 hr). At the beginning of both the storms, the region under study was located in the vicinity of the midnight meridian. Ionospheric responses to magnetic storms differed in: i) an increase in the F2-layer critical frequency at subauroral latitudes, caused by an increase in auroral precipitation, during the initial phase of the former storm and the absence of this effect in the latter; ii) a sharp drop in the critical frequency in the evening hours of the main phase of the latter storm, caused by a shift of the main ionospheric trough to lower latitudes, and the absence of this effect during the former storm; iii) generation of a short-term positive disturbance observed at subauroral latitudes only in the early recovery phase of the former storm after the negative ionospheric disturbance. During both the storms at middle latitudes there were positive disturbances and wave-like fluctuations of the critical frequency which increased in the vicinity of the dawn meridian. The main causes of the differences between the ionospheric storms are shown to be the differences between the initial conditions of the magnetosphere-ionosphere system and durations of the main phases of magnetic storms.

**Keywords:** severe magnetic storms, interplanetary drivers, winter ionospheric storm effects.

---

## ВВЕДЕНИЕ

Реакция магнитосферно-ионосферной системы на межпланетные неоднородности проявляется в экстремальных случаях в виде геомагнитных бурь и

сопровождающих их ионосферных возмущений, называемых ионосферными бурями [Брюнелли, Намгаладзе, 1988]. Пространственно-временная динамика магнитосферно-ионосферных бурь зависит от множества внешних и внутренних факторов. Ос-

новными внешними факторами считаются тип и мощность межпланетных драйверов бурь, а также время их воздействия на магнитосферу Земли. К внутренним факторам относят исходное состояние магнитосферно-ионосферной системы, время года, всемирное время начала бури (UT), географическое и геомагнитное положение наблюдательного пункта, его местное время (LT) в момент начала бури и т. д. [Buonsanto, 1999; Goodman, 2005; Sharma et al., 2005; Mendillo, 2006; Kalita et al., 2016].

Геоэффективность межпланетных структур оценивают по плотности ( $N_{sw}$ ) и скорости ( $V_{sw}$ ) солнечного ветра, азимутальной ( $B_y$ ) и вертикальной ( $B_z$ ) компонентам межпланетного магнитного поля (ММП) [Lee et al., 2004; Clauer et al., 2006; Gonzalez et al., 2011; Tsurutani et al., 2014]. Для оценки используют спутниковые данные, полученные перед околоземной ударной волной или вблизи точки либрации L1 системы Солнце — Земля. Интенсивность магнитной бури определяют по экстремальным значениям  $Dst$ -,  $SYM-H$ - и  $K_p$ -индексов.

Для изучения ионосферной бури обычно используют параметры  $f_oF2$  или  $N_mF2=1.24E4 \cdot f_oF2^2$ . Здесь  $f_oF2$  — критическая частота F2-слоя ионосферы, измеряемая станциями вертикального зондирования. По разности между текущими и фоновыми значениями  $f_oF2/N_mF2$  определяют тип ионосферного возмущения, развивающегося в исследуемой области ионосферы [Брюнелли, Намгаладзе, 1988; Buonsanto, 1999; Goodman, 2005]. В работе [Rodger et al., 1989] для оценки состояния ионосферы предложено использовать индекс возмущенности  $\ln(N/N_0)$ , где  $N$  — текущее, а  $N_0$  — фоновое (измеренное в магнитоспокойные дни) значение  $N_mF2$ . В работах [Wang et al., 2014; Chen et al., 2014] предложен метод определения локального и планетарного индексов ионосферной возмущенности по апериодической составляющей рядов  $f_oF2$ . Однако пока эти индексы не получили широкого распространения.

Важно отметить, что недостаточное пространственное разрешение данных, получаемых с помощью наземных и спутниковых ионозондов, не позволяет воспроизвести глобальную картину развития ионосферной бури. Для устранения этого недостатка в большинстве современных исследований используются данные по полному электронному содержанию (ПЭС) [Mendillo, 2006; Borries et al., 2016; Dmitriev et al., 2017]. Однако во время магнитных бурь вариации ПЭС могут значительно отличаться от вариаций  $N_mF2$  (см., например, статью [Liu et al., 2016] и цитированную в ней литературу). Это ставит под сомнение правомерность использования данных по ПЭС при разработке и тестировании моделей, адекватно отражающих динамику возмущенной ионосферы и, соответственно, условий распространения радиоволн. Кроме того, интегральный характер значений ПЭС не позволяет следить за изменениями электронной концентрации в E-области ионосферы, которая, наряду с F-областью, сильно влияет на условия распространения радиоволн. Поэтому исследование ионосферы с помощью ионозондов по-прежнему актуально.

Задача нашей работы — сравнить реакцию ионосферы на сильные геомагнитные бури 14–16 декабря 2006 г. и 19–22 декабря 2015 г. Эти бури близки по интенсивности, сезону и времени начала. Актуальность сравнительного анализа близких по сезону событий и результатов их моделирования обоснована в работах [Kalita et al., 2016; Zhang et al., 2017; Dmitriev et al., 2017], посвященных сильным магнитным бурям 17–19 марта 2013 г. и 2015 г. с минимальными значениями  $Dst_{min}=-132$  и  $-222$  нТл соответственно. Авторы последней из указанных работ дополнительно рассмотрели умеренную бурю 8–9 марта 2008 г. ( $Dst_{min}=-86$  нТл). Они получили количественное соответствие между рассчитанными по модели ГСМ ТИП (Глобальная самосогласованная модель термосферы, ионосферы и протоносферы) и экспериментальными значениями  $N_mF2$  для бури 2008 г., качественное для бури 2013 г. и полное несоответствие для бури 2015 г., самой сильной из рассмотренных. Ранее значительные расхождения между измеренными и полученными с помощью наиболее известных моделей значениями ионосферных параметров для сильных магнитных бурь были отмечены в обзоре [Buonsanto, 1999]. Это указывает на необходимость выявления всех взаимосвязей между гелиосферно-магнитосферно-ионосферно-термосферными процессами, которые должны быть учтены при моделировании отклика ионосферы на сильную магнитную бурю.

Наше исследование базируется на данных, полученных наземными ионозондами в одном и том же регионе Восточной Азии. Это дает нам возможность частично исключить перечисленные выше внутренние факторы и тем самым уточнить связи между ионосферными бурями, магнитными бурями и их межпланетными драйверами. Для более детального исследования данные вертикального зондирования будут дополнены данными, полученными на радиотрассах, проходящих через исследуемую область, и данными по ПЭС, полученными с помощью системы GPS. Кроме того, использование сети ионозондов, охватывающей широты от  $18^\circ$  до  $69^\circ$  N, позволит нам получить новую информацию о взаимосвязях между процессами, вызывающими ионосферные возмущения в различных широтных зонах.

Наша статья организована следующим образом. В части 1 мы сравним основные характеристики магнитных бурь и их межпланетных драйверов; в части 2 — отклики ионосферы на магнитные бури. В части 3 мы обсудим возможные причины различий в динамике ионосферных возмущений в течение двух бурь; в части 4 подведем итоги исследования.

## 1. МАГНИТНЫЕ БУРИ И ИХ МЕЖПЛАНЕТНЫЕ ДРАЙВЕРЫ

Рассматриваемые нами бури 14–16 декабря 2006 г. и 19–22 декабря 2015 г. тождественны по сезону, близки по часу начала и интенсивности. Они начались около 14 и 16 UT за восемь дней и три дня до зимнего солнцестояния и характеризовались

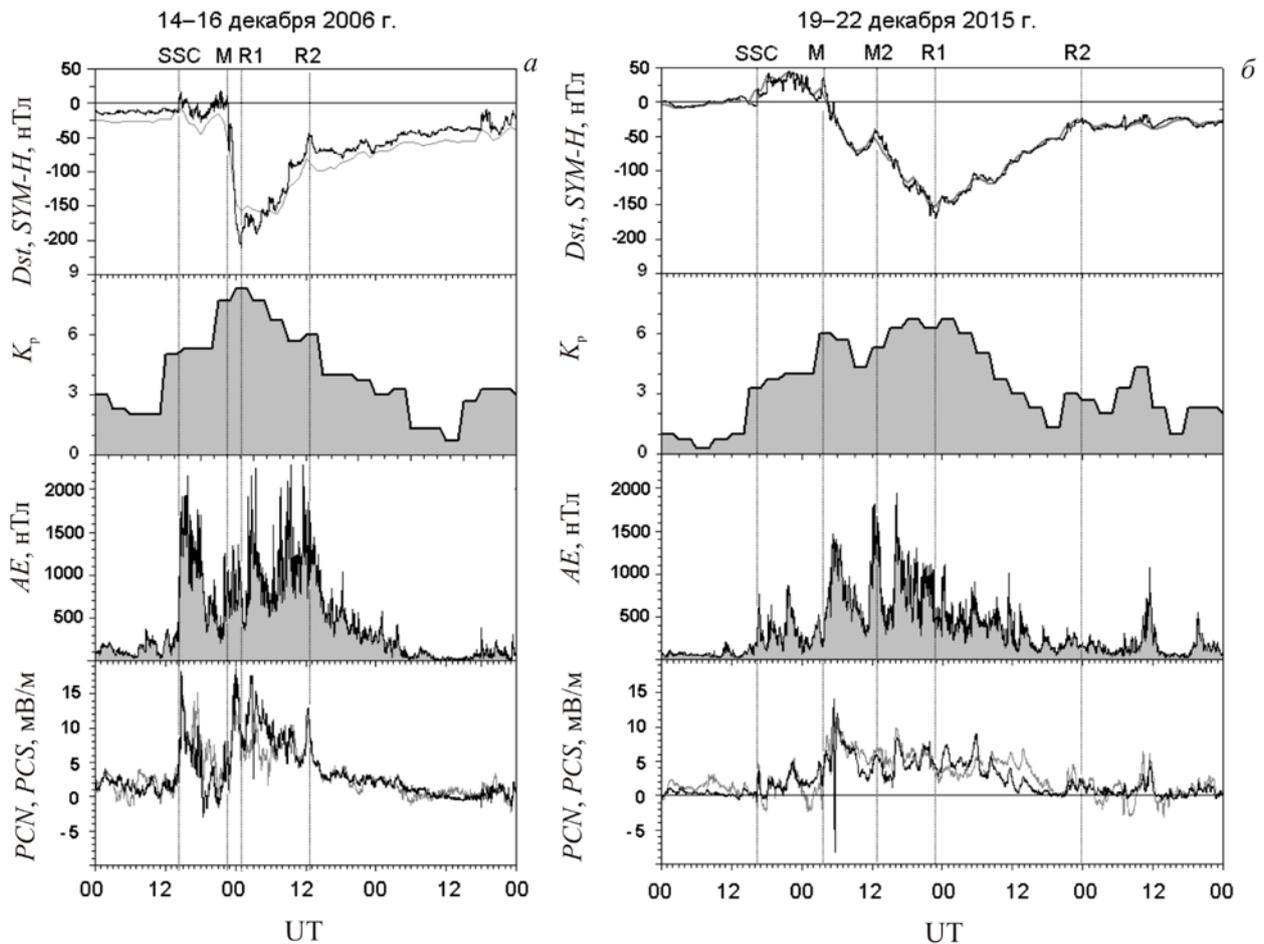


Рис. 1. Сверху вниз показаны: вариации SYM-H (черная линия) и Dst (серая линия) индексов,  $K_p$ -, AE-индексов и PCN/PCS (черная/серая линия) индексов для бурь S2006 (а) и S2015 (б)

Таблица 1

Фазы геомагнитных бурь

Буря	Фаза бури										
	начальная		главная				восстановительная				
	UT, день	$\Delta T$ , ч	UT, день	$\Delta T$ , ч	ступени		ранняя		поздняя		
				UT, день	$\Delta T$ , ч	UT, день	$\Delta T$ , ч	UT, день	$\Delta T$ , ч	UT, день	$\Delta T$ , ч
14–16 декабря 2006 г.	14:15–22:29, 14 декабря	8.25	22:29–00:55, 14–15 декабря	2.5			00:55–12:30, 15 декабря	11.5	12:30–17:56, 15–16 декабря	29.5	
19–24 декабря 2015 г.	16:18–03:42, 19–20 декабря	11.5	03:42–22:52, 20 декабря	19	03:42–09:34, 12:48–22:52, 20 декабря	6, 10	22:52–23:52, 20–21 декабря	25.0	23:52–13:22, 21–24 декабря	61.4	

$Dst_{min} = -162$  и  $-155$  нТл соответственно. Для краткости изложения введем обозначения S2006 для первой и S2015 для второй бури.

Изменения геомагнитных индексов в ходе бурь показаны на рис. 1, геоэффективных параметров солнечного ветра и ММП — на рис. 2. Графики на рис. 2 построены по данным спутников ACE для S2006 и WIND для S2015. Во время измерений спутники находились вблизи точки либрации L1 системы Солнце — Земля на расстояниях  $\sim 42R_E$  и  $\sim 27R_E$  ( $R_E$  — радиус Земли) от оси  $X_{GSE}$  и давали адекватную информацию о характеристиках межпланетной среды, воздействовавшей на магнитосферу [King, 1986; Ericsson et al., 2000].

Основываясь на тенденциях изменения индекса SYM-H, мы определили временные интервалы, соот-

ветствующие различным фазам бурь (см. табл. 1). Границы интервалов показаны на рис. 1 вертикальными линиями. Вертикальные линии на рис. 2 соответствуют линиям, приведенным на рис. 1, и таким образом, ограничивают межпланетные структуры, совпадающие по времени прихода к подсолнечной точке магнитосферы с соответствующими фазами бурь. Отмеченные на рис. 2 моменты UT определены путем переноса фрагментов гелиосферной плазмы со скоростью  $V_{sw}$ . Линии, обозначенные символами SSC (storm sudden commencement), M, R1 и R2, отмечают внезапные начала бурь, начала их главной, ранней и поздней восстановительных фаз соответственно на первом и последующих рисунках. Линия

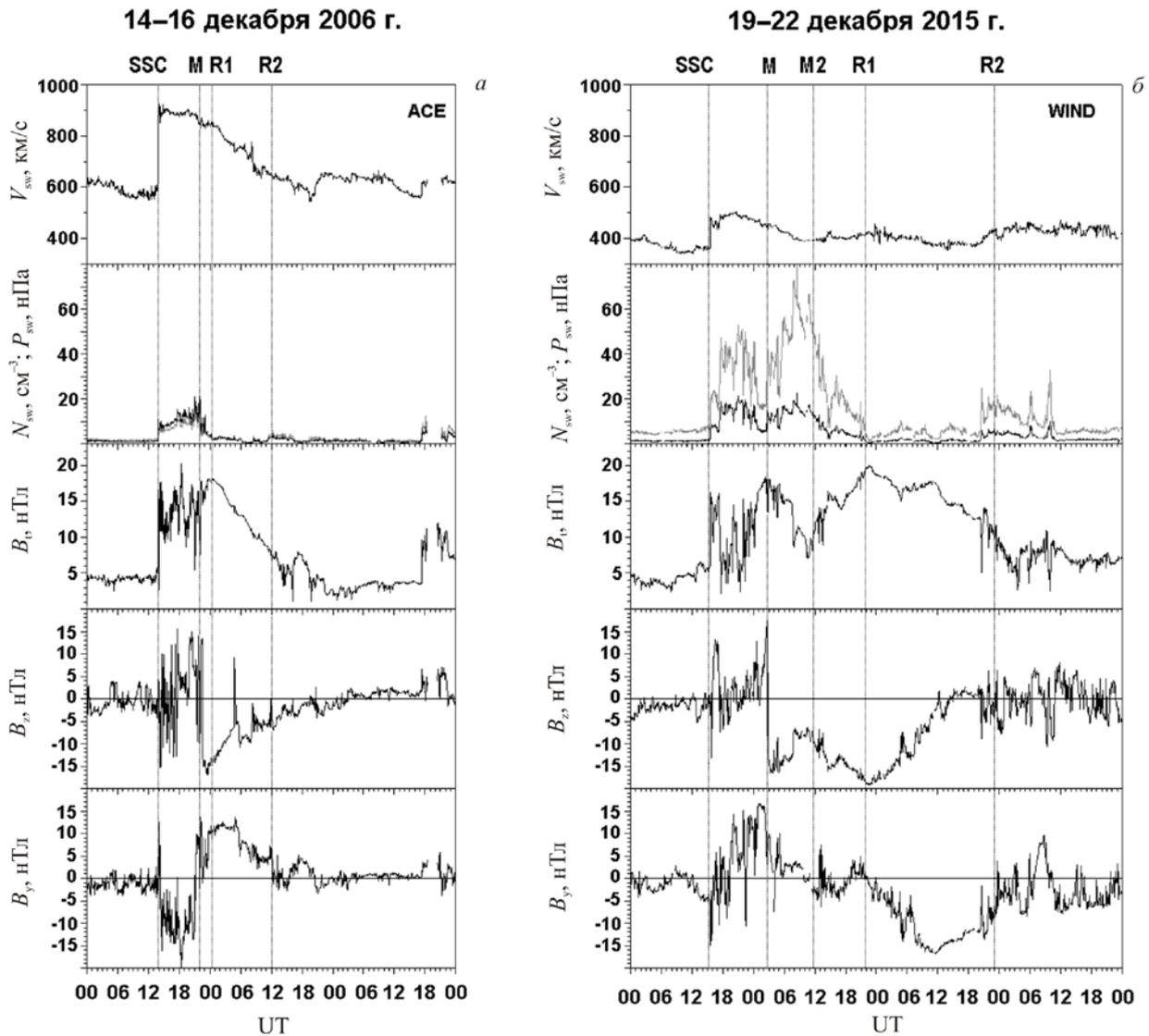


Рис. 2. Вариации скорости ( $V_{sw}$ ), лобового давления и плотности ( $P_{sw}$  и  $N_{sw}$ , черная и серые линии соответственно) солнечного ветра, модуля ( $B_t$ ), вертикальной ( $B_z$ ) и азимутальной ( $B_y$ ) компонент межпланетного магнитного поля в координатной системе GSM (сверху вниз). Вертикальные линии соответствуют началам и концам фаз магнитных бурь, отмеченным на рис. 1 и перечисленным в табл. 1

M2 отмечает начало второго понижения *SYM-H*, т. е. начало второй ступени главной фазы S2015.

Под графиками *Dst* и *SYM-H* показаны вариации трехчасового  $K_p$ -индекса, минутных *AE*- и *PCN/PCS*-индексов. Индекс  $K_p$  служит мерой планетарной магнитной активности; *AE* — магнитной возмущенности в авроральной зоне. Индексы полярных шапок (*PCN* и *PCS*), определяемые по магнитным данным полярных станций «Туле» и «Восток», соответствуют величине геоэффективного межпланетного электрического поля (МЭП), воздействующего на магнитосферу [Troshichev et al., 2006].

Основываясь на графиках рис. 1, 2, перечислим в хронологическом порядке особенности, наиболее явно отражающие сходство и различие между магнитными бурями и их межпланетными драйверами.

1. Графики изменений *Dst*-индекса, приведенные на сайте [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>], показывают, что средний уровень геомагнитной активности в течение пяти суток, предшествовавших

бурям, в декабре 2006 г. был выше ( $Dst \sim -30$  нТл,  $K_p \sim 3-$ ), чем в декабре 2015 г. ( $Dst \sim -10$  нТл,  $K_p \sim 2$ ). За час до начала первой бури  $Dst \sim -25$  нТл,  $K_p \sim 2$ ; за час до второй —  $Dst \sim 0$  нТл и  $K_p \sim 1$ . Таким образом, в момент SSC события S2006 магнитосфера Земли находилась в менее стабильном состоянии, чем в момент SSC события S2015.

2. Радиальная скорость и плотность солнечного ветра увеличились до  $V_{sw} \sim 900$  км/с и  $N_{sw} \sim 9$  см<sup>-3</sup> на переднем фронте драйвера S2006; до  $V_{sw} \sim 480$  км/с и  $N_{sw} \sim 20$  см<sup>-3</sup> на переднем фронте драйвера S2015. Относительно низкая скорость и высокая плотность солнечного ветра наблюдались во всей области межпланетного драйвера S2015.

3. Различные по амплитуде скачки лобового давления  $\Delta P_{sw} \sim 9$  и  $\sim 4$  нПа на передних фронтах драйверов S2006 и S2015 вызвали почти одинаковые скачки  $\Delta SYM-H \sim 22$  и 24 нТл, но разные возмущения *AE*-индекса. В первом случае пикообразные увеличения *AE* до 1000–2100 нТл начались сразу

после SSC и наблюдались около 4 ч. Во втором за SSC последовал пик *AE* высотой  $\sim 760$  нТл и продолжительностью  $\sim 0.5$  ч. Пики *AE* указывают на развитие суббуреподобных возмущений (substorm-like events), триггерами которых могли быть изменения параметров межпланетной среды, в том числе на передних фронтах межпланетных драйверов бурь. Эти фронты принято называть межпланетными ударными волнами [Bargatze et al., 1985; Zhou, Tsurutani, 2001; Yue et al., 2010]. Разница в откликах авроральных токов на ударные волны могла быть обусловлена по меньшей мере тремя факторами. Это различия между величинами  $\Delta P_{sw}$ , исходными состояниями магнитосферно-ионосферной системы и напряжениями МЭП (см. графики *PCN* и *PCS* на рис. 1).

4. Графики, приведенные на рис. 1, и данные табл. 1 показывают, что бури наиболее сильно различаются продолжительностью ( $\Delta T$ ) и структурой главной фазы. Буря S2006 — одноступенчатая, а буря S2015 — двухступенчатая. В течение 2.5-часовой главной фазы первой бури *SYM-H*-индекс понижался со средней скоростью  $\sim -90$  нТл/ч от *SYM-H*  $\sim 0$  нТл до минимального *SYM-H* =  $-211$  нТл. В течение 19-часовой главной фазы второй бури индекс *SYM-H* уменьшился от 34 до  $-77$  нТл (первая ступень), увеличился до  $-40$  нТл и вновь уменьшился до *SYM-H*<sub>min</sub> =  $-170$  нТл (вторая ступень) через 6, 9 и 19 ч после начала данной фазы. В этом случае средняя скорость понижения *SYM-H*-индекса составляла  $\sim -10$  нТл/ч. Экстремальные значения  $K_p$  были 8+ в первую бурю и 7– во вторую бурю.

5. Графики  $B_z$ , приведенные на рис. 2, показывают, что главные фазы обеих бурь соответствуют по времени областям направленной на юг  $B_z$ -компоненты ММП. На передних фронтах этих областей наблюдался резкий, продолжавшийся около 10 мин поворот  $B_z$  от севера к югу, вызвавший усиление МЭП. При этом значения  $B_z$  одинаково изменились от  $\sim 15$  нТл до  $-15$  нТл. Ответственная за генерацию главной фазы часть драйвера S2006 содержала магнитное облако — область сильного, медленно меняющегося по величине и направлению магнитного поля с низкой плотностью солнечного ветра:  $N_{sw} \sim 2$  см<sup>3</sup>. Считается, что межпланетные драйверы такого типа являются наиболее мощными гелиосферными источниками геомагнитных бурь [Tsurutani, Gonzalez, 1997; Gonzalez et al., 2002; Vorovsky, Denton, 2010]. Большая плотность солнечного ветра в области, соответствующей главной фазе S2015 двухфазного усиления отрицательной  $B_z$  ММП не позволяет считать эту структуру магнитным облаком.

6. Судя по максимальным значениям *PCN*- и *PCS*-индексов, напряженность МЭП и, соответственно, поля магнитосферной конвекции в главную фазу S2006 была в  $\sim 1.5$  раза больше, чем на первой ступени S2015. Это различие связано с меньшей, чем в случае S2006, скоростью межпланетного драйвера S2015 и слабой  $B_y$ -компонентой ММП в области, ответственной за генерацию главной фазы второй бури. Несмотря на сильную магнитосферную конвекцию, значения *AE*-индекса в главную фазу S2006 были в 1.5–2 раза меньше, чем в главную фазу S2015.

Zolotukhina et al. [2012] показали, что в главную фазу S2006 центр западного джета находился не в авроральной, а в субавроральной зоне. Отсюда следует, что в данном случае *AL*- и *AE*-индексы дают заниженную оценку авроральной активности.

7. Ранние восстановительные фазы S2006 и S2015 соответствуют периодам немоного ослабления направленной к югу  $B_z$ -компоненты ММП. Ранняя восстановительная фаза события S2006 развивалась при  $B_y > 0$ . В конце этой фазы наблюдалось усиление авроральной активности с ростом *AE* до  $\sim 2000$  нТл. Согласно результатам, полученным в [Troshichev et al., 1986], триггером усиления могло быть изменение знака  $B_y$  ММП с положительного на отрицательный. Ранняя восстановительная фаза события S2015 развивалась при  $B_y < 0$ . В работе [Velichko et al., 2002] показано, что при такой ориентации ММП интенсивность геомагнитных возмущений в авроральной зоне Южного полушария больше, чем в авроральной зоне Северного полушария.

8. Различия в характеристиках межпланетных драйверов бурь были обусловлены различиями между их первичными источниками. Внешним драйвером S2006 был межпланетный выброс корональной массы (interplanetary coronal mass ejection, ICME), образовавшийся около 02:40 UT 13 декабря после вспышки класса X3.4/4B [http://www.solen.info/solar/old\_reports]. Комплексный межпланетный драйвер S2015 сформировался в результате взаимодействия двух ICMEs, появление которых было зафиксировано в 09:36 и 14:24 UT 16 декабря [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\_list]. Первый выброс сопровождал вспышку класса C6/1F и двигался с замедлением; второй был связан с выбросом волокна (filament eruption) и двигался с ускорением.

## 2. ИОНОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

Для анализа отклика ионосферы на магнитные бури были использованы данные ионосферных станций, расположенных в Восточной Азии, и трех радиотрасс наклонного зондирования. Координаты ионосферных станций, приемопередающих пунктов радиотрасс и их средних точек приведены в табл. 2. Ионосферная возмущенность оценивалась относительно фоновых значений, полученных в результате усреднения ионосферных параметров, измеренных в спокойных геомагнитных условиях (5 и 13 декабря 2006 г. и 17 и 18 декабря 2015 г.). Вариации  $f_oF_2$ , предельной частоты спорадического E-слоя ( $f_oE_s$ ), а также максимальных наблюдаемых частот односкачкового (МНЧ1F) и двухскачкового (МНЧ2Es) модов показаны на рис. 3, 4 для S2006 и S2015 соответственно.

### 2.1. Начальная фаза

Во время двух SSC рассматриваемая нами цепочка ионозондов находилась в ночном секторе. В обоих случаях спорадические E-слои ( $E_s$ ), характерные для зоны диффузных высыпаний, наблюдались на высокоширотных станциях «Жиганск» и «Якутск» до и после SSC. Различие между откликами

Таблица 2

Координаты ионосферных станций, приемо-передающих пунктов и средних точек радиотрасс

N	Станции	Географические координаты	
		Широта, °N	Долгота, °E
1	Норильск	69.4	88.1
2	Жиганск	66.3	123.4
3	Якутск	62.0	129.9
4	Магадан	60.0	151.0
5	Иркутск	52.5	104.0
6	Mohe	52.0	122.5
7	Хабаровск	48.5	135.1
8	Wakkanai	45.4	141.7
9	Beijing	40.0	116.3
10	Jeju	33.1	126.3
11	Yamagawa	31.2	130.6
12	Okinawa	26.3	127.8
13	Sanya	18.3	109.4
14	Магадан—Иркутск (средняя точка)	58.5	122.8
15	Хабаровск—Иркутск (средняя точка)	51.25	119.6
16	Норильск—Иркутск (средняя точка)	60.9	98.0

высокоширотной ионосферы на начальные фазы бурь заключается в резком изменении ионосферных параметров для S2006 и отсутствии их явно выраженных изменений для S2015. На рис. 3 видно, что на ст. «Жиганск» диффузные отражения от F2-слоя с повышенными  $f_oF2$  наблюдались только в течение первого часа, а отражения от интенсивных слоев  $E_s$ , чередующиеся с сеансами полного поглощения, в течение всей начальной фазы. На ст. «Якутск» в это время наблюдались  $E_s$ -слои и диффузные отражения от F2-слоя, критические частоты которого были в 1.5–2 раза выше, чем в спокойных геомагнитных условиях.

На среднеширотной станции «Магадан» в ночные часы S2006 отражения на ионограммах отсутствовали, что может свидетельствовать о том, что она находилась в зоне ГИП. Этот вывод подтверждается данными наклонного зондирования. На трассе Магадан — Иркутск отражения регулярных модов отсутствовали. Следовательно, северный участок трассы от пункта излучения до ее середины находился в области ГИП. С 17:40 до 19:30 UT 14 декабря регистрировались только аномальные диффузные сигналы, распространяющиеся вне дуги большого круга, что также указывает на близость полярной стенки ГИП к трассе распространения КВ-радиоволн. На меридиональной трассе Норильск — Иркутск регистрировался только мод  $2E_s$ , что указывает на развитие  $E_s$ -слоев вдоль трассы распространения. В ночные часы S2015 наблюдался F2-слой с критическими частотами, близкими к фоновым величинам. Исходя из этого, можно заключить, что в начальную фазу S2015 границы ГИП располагались севернее, чем в начальную фазу S2006.

На остальных среднеширотных станциях в начальные фазы обеих бурь значения  $f_oF2$  незначительно

отличались от фоновых. Основное отличие в отклике среднеширотной ионосферы связано с появлением плоских спорадических слоев на ст. «Иркутск» и «Моhe» во время S2015. Отметим, что начальная фаза S2015 была более продолжительной, чем начальная фаза S2006, и охватывала утренний сектор. На ст. «Магадан», «Иркутск» и «Хабаровск» в утренние часы наблюдались волнообразные колебания  $f_oF2$ , обусловленные прохождением средне-масштабных перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), проявившихся в виде серпов и крючков на высокочастотном участке ионограмм.

## 2.2. Главная фаза

Главная фаза S2006 началась в утреннем, а S2015 — в предположенном секторе. Наиболее заметные увеличения  $f_oF2$  во время S2006 отмечены в утреннем секторе на станциях, расположенных на долготах 130–150° E. В это время на высокоширотных станциях отраженные сигналы на ионограммах отсутствовали из-за поглощения.

Первая ступень главной фазы S2015 характеризовалась развитием положительного возмущения на всех широтах. Заметное увеличение  $f_oF2$  наблюдалось на ст. «Жиганск» (на ~30–35 %), «Якутск» (~40–50 %), «Иркутск» (~ 30–40 %) и «Okinawa» (~60–70 %). Это положительное возмущение охватывало дневные и вечерние часы. Судя по морфологическим свойствам, оно могло быть связано с усилением меридиональной, направленной в сторону экватора компоненты термосферного ветра. Возмущение развивалось одновременно с пикообразными увеличениями PCN-, PCS- и AE-индексов, указывающими на усиление поля магнитосферной конвекции и авроральных электроджетов, и многократными повышениями  $N_{sw}$  до 40–70 см<sup>-3</sup>, способными вызвать

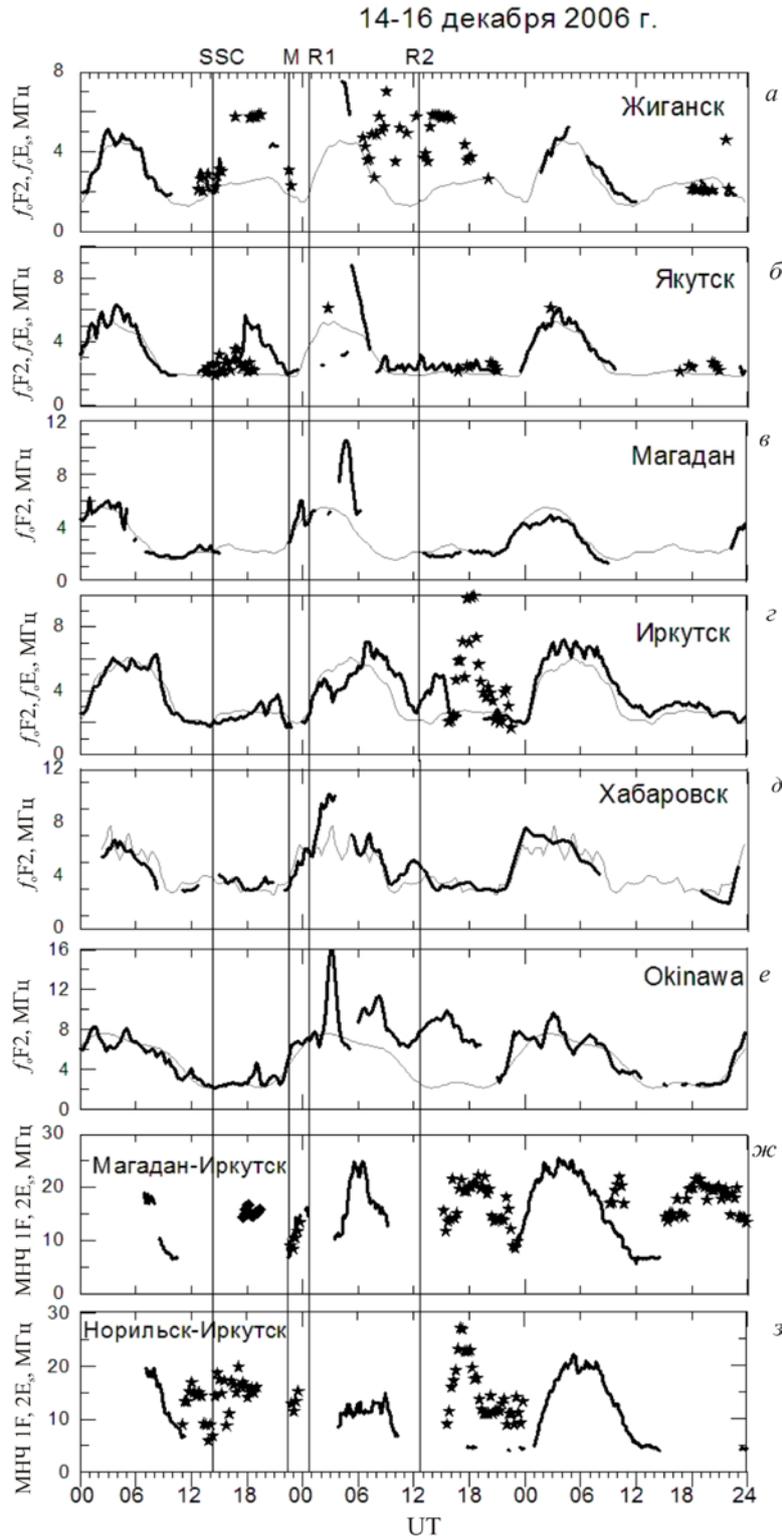


Рис. 3. Вариации критической частоты слоя F2 (а–е) в спокойных (серая линия) и возмущенных (черная линия) условиях, предельной частоты слоя E<sub>s</sub> (а, б, г, звездочки) на сети ионозондов и максимальных наблюдаемых частот (ж, з) односкачкового мода (МНЧ1F, черная линия) и двухскачкового мода (МНЧ2E<sub>s</sub>, звездочки) на трассах Магадан — Иркутск и Норильск — Иркутск во время магнитной бури 14–16 декабря 2006 г. Квадратами отмечены МНЧ сигналов, распространяющихся вне дуги большого круга

увеличение потоков частиц, высыпающихся в высокоширотную ионосферу. Приведенный на рис. 6, г график вариаций *H*-компоненты геомагнитного поля показывает, что на авроральной станции «Тикси» наблюдались лишь слабые усиления восточного электроджета. Такие усиления часто наблюдаются

даже в магнитоспокойных условиях. Они не способны обеспечить нагрев атмосферы, достаточный для генерации положительного элемента ионосферной бури, наблюдавшегося в изучаемом нами долготном секторе. Мы считаем, что в этом случае положительное возмущение было вызвано нагревом

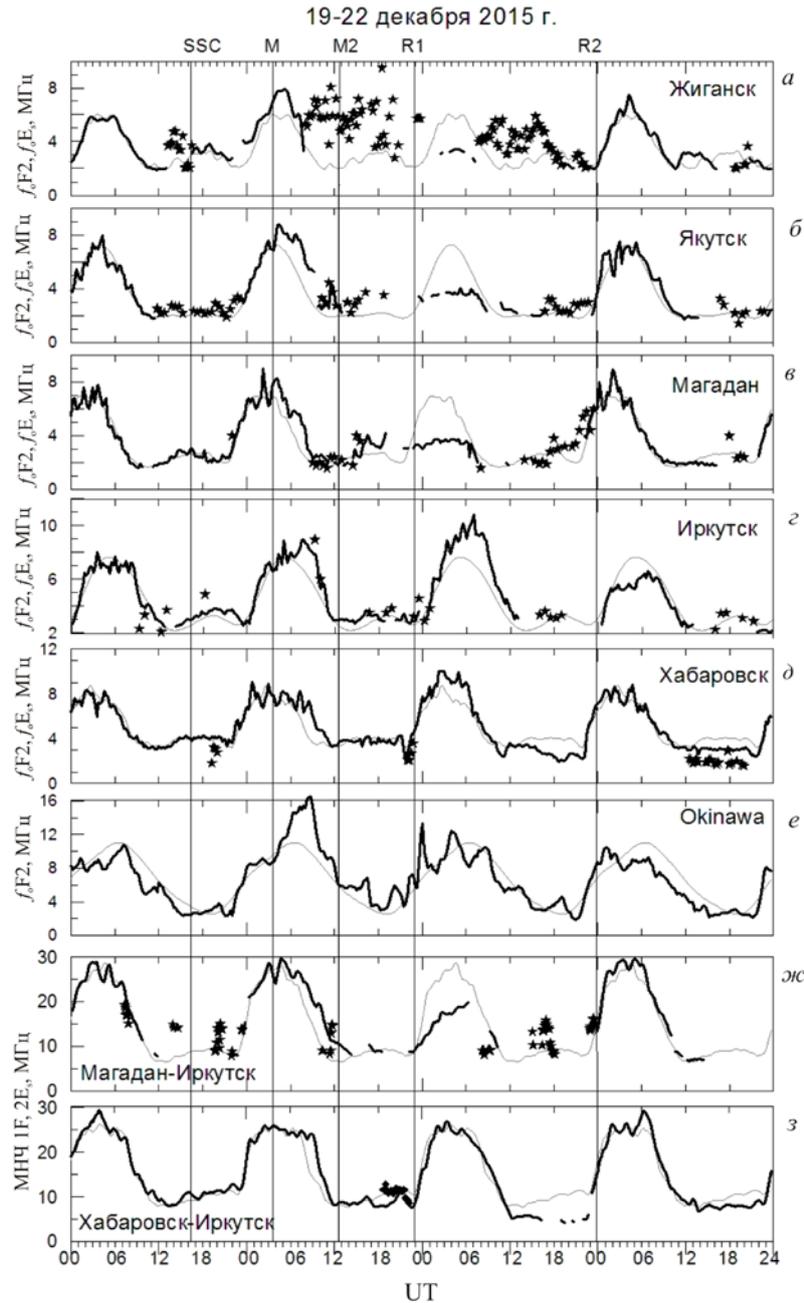


Рис. 4. Вариации критической частоты слоя F2 (а–е) в спокойных и возмущенных условиях, предельной частоты слоя E<sub>s</sub> (а–д) на сети ионозондов и МНЧ (ж, з) односкачкового мода (1F) и двухскачкового мода (2E<sub>s</sub>) на трассах Магадан — Иркутск и Хабаровск — Иркутск во время магнитной бури 19–22 декабря 2015 г. Обозначения те же, что на рис. 3

атмосферы в ночной части авроральной зоны и в области Каспа.

На высокоширотных станциях 20 декабря 2015 г. в интервале 07:30–10:00 UT (15:30–18:00 LT) наблюдался типичный для возмущенных условий резкий вечерний спад критических частот («срыв суточного хода»), сменившийся появлением интенсивных экранящих спорадических слоев. Ночью (во время второй ступени главной фазы) на среднеширотных станциях «Магадан», «Иркутск» и «Хабаровск» наблюдались плоские слои E<sub>s</sub>. В тот же день в конце второй ступени (в 21:30–21:45 UT) критическая частота, по данным ст. «Хабаровск», снизилась до 2 МГц, а на ионограммах наклонного зондирования трассы Хабаровск — Иркутск были зарегистрированы аномальные

сигналы, распространяющиеся вне дуги большого круга. На низкоширотной станции «Окинава» наблюдались волнообразные возмущения f<sub>0</sub>F2, которые продолжались и в восстановительную фазу бури.

Судя по графикам МНЧ, в главную фазу S2006 прохождение КВ-радиосигналов на трассе Магадан — Иркутск осуществлялось модами 1F и 2E<sub>s</sub>, а на трассе Норильск — Иркутск только модом 2E<sub>s</sub>. В главную фазу S2015 этот мод наблюдался только на трассе Магадан — Иркутск перед началом второй ступени главной фазы.

### 2.3. Восстановительная фаза

В течение ранних восстановительных фаз обеих бурь сильные изменения ионосферных параметров

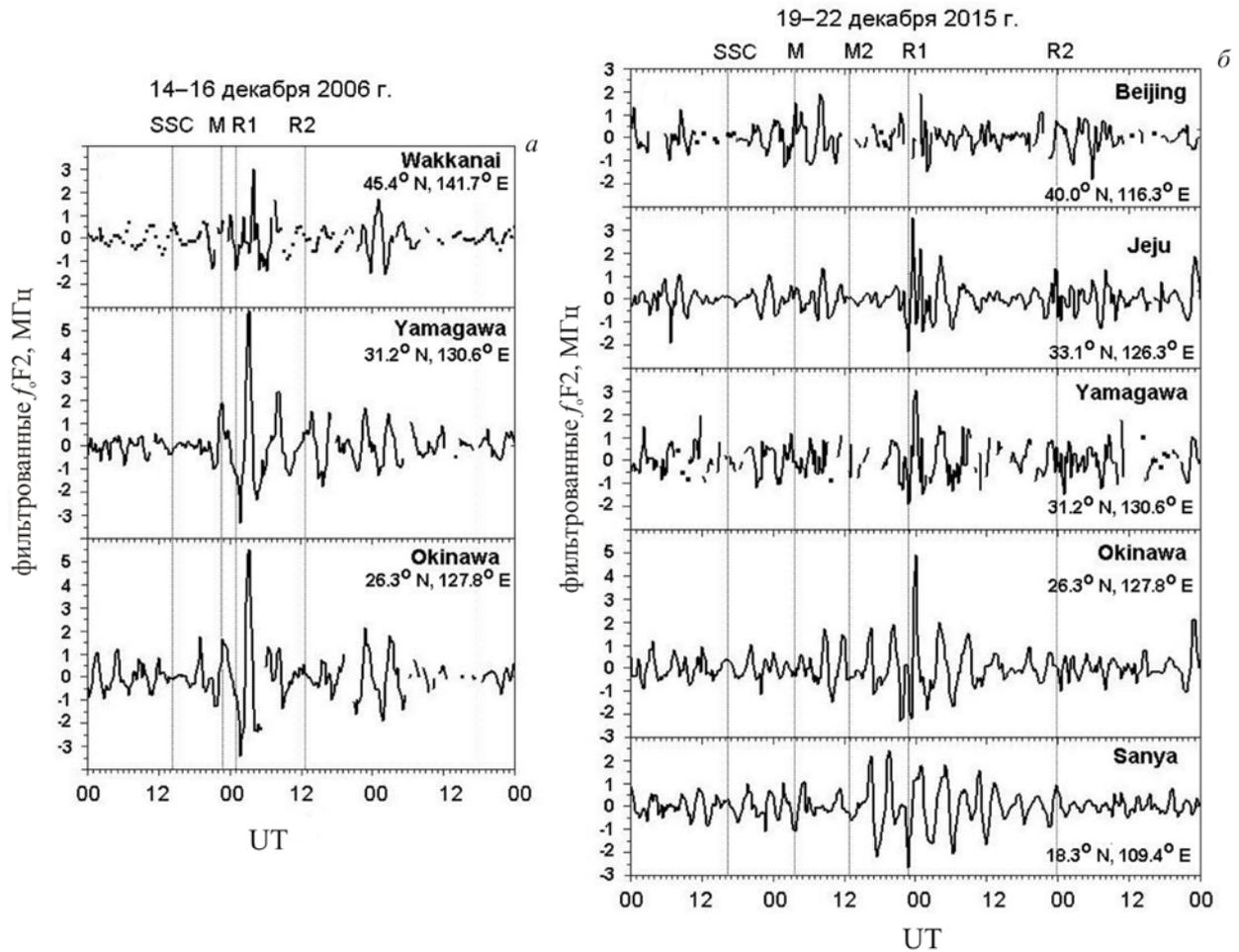


Рис. 5. Вариации  $f_oF2$  с периодами  $T \leq 5$  ч, наблюдавшиеся во время S2006 (а) и S2015 (б) в Восточной Азии

наблюдались на всех широтах. Во время события S2006 на ст. «Жиганск» в околополуденные часы отражения отсутствовали из-за возросшего поглощения [Zolotukhina et al., 2012]. Днем на ст. «Якутск» эпизодически регистрировались крайне низкие величины  $f_oF2$ . Главной особенностью поведения  $f_oF2$  является генерация кратковременного положительного возмущения, наблюдавшегося на ст. «Жиганск» в 04:15–05:00 UT, на ст. «Якутск» в 05:15–06:15 UT, на ст. «Магадан» в 04:00–05:30 UT, на ст. «Хабаровск» в 02:30–03:30 UT, на ст. «Окинава» в 02:45–04:00 UT 15 декабря 2006 г. Такой же кратковременный рост МНЧ наблюдался на трассе Магадан — Иркутск в 05:00–06:30 UT. На трассе Норильск — Иркутск подобного роста МНЧ не наблюдалось. В остальные часы на среднеширотных станциях регистрировались критические частоты, заметно превышающие фоновые величины. Исключением являются вариации  $f_oF2$  на ст. «Хабаровск», где в это время критические частоты F2-слоя были близки к фоновым значениям.

В восстановительную фазу S2015 днем на ст. «Жиганск», «Якутск» и «Магадан» наблюдалось отрицательное возмущение, при котором  $f_oF2$  уменьшилась в 1.5–2 раза относительно фоновых величин. В это время над ст. «Иркутск» и «Хабаровск» развивались положительные возмущения.

Особый интерес представляет появление над ст. «Иркутск» в ночные часы 15 декабря 2006 г. (в 16:30–20:00 UT) интенсивных экранирующих  $E_s$ -слоев, способствовавших распространению КВ-радиосигналов только модом  $2E_s$  на трассах Магадан — Иркутск и Норильск — Иркутск. Отметим, что 21 декабря 2015 г. в указанном интервале UT на ст. «Якутск», «Магадан» и «Иркутск» наблюдались  $E_s$ -слои, а на трассе Магадан — Иркутск регистрировался только мод  $2E_s$ . На ст. «Моhe» отражения отсутствовали. Критические частоты на ст. «Хабаровск» и МНЧ на трассе Хабаровск — Иркутск были заметно ниже фоновых значений. Это могло быть связано с медленным восстановлением плазмосферы и, соответственно, сопряженной с ней ионосферы после главной фазы магнитной бури [Романова, Тащилин, 2013; Тащилин, Романова, 2014]. На низкоширотной станции «Окинава» восстановительные фазы бурь сопровождались волнообразными возмущениями  $f_oF2$ .

Отметим, что волнообразные возмущения  $f_oF2$  наблюдались как до бурь, так и в течение всех их фаз. В более явном виде это показано на рис. 5. Представленные на нем графики построены по вариациям  $f_oF2$  с периодами 1–5 ч, выделенным из исходных рядов полосовым фильтром, не искажающим фазу [Marmet, 1979]. Границы фильтра определены по спектрам  $f_oF2$ . На рис. 3 (построен для

S2006) волнообразные возмущения на графиках  $f_oF2$  видны только на станциях, расположенных южнее  $48^\circ$  N. Фильтрованные ряды  $f_oF2$  представлены для этих станций на рис. 5, а. На рис. 4 видно, что во время S2015 возмущения данного типа наблюдались также на ст. «Магадан» и «Якутск». Однако из-за продолжительных пропусков в исходных рядах графики фильтрованных значений  $f_oF2$  для этих станций на рис. 5, б не показаны.

Обратим внимание на то, что все пять отчетливо видных на рис. 5, а, б усиления волнообразных возмущений до уровня, превышающего предбуравовую (два во время S2006 и три во время S2015), наблюдались 14–15 декабря 2016 г. и 19–21 декабря 2015 г. в 21:00–23:00 UT. Для изучаемого долготного сектора это соответствует окрестности утреннего меридиана. Первое из двух усиления, наблюдавшихся во время S2006, исследовано в работе [Lei et al., 2008]. В ней показано, что волнообразные возмущения были созданы суперпозицией ПИВ, возникших вследствие джоулева нагрева высокоширотной атмосферы Северного и Южного полушарий и распространявшихся к югу и к северу соответственно.

#### 2.4. Сопоставление

Суммируя изложенное в пунктах 2.1–2.4, укажем на наиболее очевидное сходство и различие между рассмотренными ионосферными бурями.

2.4.1. В обоих случаях спорадические слои, обусловленные высыпаниями частиц, наблюдались на субавроральных станциях как до бурь, так и во время их начальных фаз. Различия между откликами ночной ионосферы на начальные фазы проявились в том, что положительное ночное ионосферное возмущение (рост  $f_oF2$ ) и резкое увеличение  $f_oE_s$  были зафиксированы в субавроральной зоне только во время S2006, а ночные плоские  $E_s$ -слои наблюдались в среднеширотной зоне (ст. «Иркутск» и «Моhe») только во время S2015.

2.4.2. В бурю 19–22 декабря 2015 г. отчетливые ионосферные возмущения начались с положительного дневного возмущения, наблюдавшегося на всех ионосферных станциях на первой ступени главной фазы. В субавроральной зоне за этим возмущением последовало резкое падение  $f_oF2$ , сменившееся появлением интенсивных экранирующих  $E_s$ -слоев с предельными частотами, близкими к наблюдавшимся в начальную фазу S2006.

2.4.4. Спецификой события S2006 является мощное кратковременное увеличение  $f_oF2$ , наблюдавшееся 14 декабря в послеполуденном секторе на ст. «Жиганск», «Якутск» и «Магадан». В работе [Zolotukhina et al., 2012] обнаружено, что быстрый рост  $f_oF2$  над этими станциями соответствовал по времени проходу наблюдательных пунктов под резким внутренним краем плазменного слоя.

2.4.5. В работе [Pigo et al., 2006] показано, что для зимних ионосферных бурь, развивающихся над Восточной Азией в дневные часы восстановительной фазы, характерны высокоширотные отрицательные и среднеширотные положительные возмущения. Такое широтное распределение возмущений

действительно наблюдалось в дневные часы ранних восстановительных фаз обеих бурь. Однако переход от отрицательного к положительному возмущению произошел во время S2006 между ст. «Якутск» и «Магадан», а во время S2015 южнее — между ст. «Магадан» и «Моhe».

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

Многолетние исследования ионосферы с помощью ионозондов, начавшиеся в середине 20-х гг. прошлого века, создали экспериментальную базу для классификации основных элементов ионосферных бурь, основанную на их предполагаемом происхождении. Такая классификация сделана, например, в работе [Prölss et al., 1991]. Авторы выделили пять основных элементов ионосферной бури в субавроральных широтах. Три из них возникают вследствие продолжительного или импульсного джоулева нагрева атмосферы и распространяются в сторону экватора; два других — вследствие уменьшения широты зоны авроральных высыпаний и главного ионосферного провала. Дальнейшие исследования показали, что значительный вклад в динамику ионосферных бурь вносят также быстро проникающие электрические поля магнитосферного происхождения и поле «возмущенного динамо» термосферного происхождения [Huang, 2013]. Эффекты электрических полей наиболее ярко проявляются в окрестности экваториальной ионосферной аномалии.

Рассмотрим с этой точки зрения результаты сравнительного анализа ионосферных бурь, представленные в разделе 2. Эффекты, вызванные смещением крупномасштабных ионосферных структур в сторону меньших широт, наблюдались 14 декабря 2006 г. и 20 декабря 2015 г. Согласно [Prölss et al., 1991], первый из них (положительное ночное возмущение, см. п. 2.1) связан с расширением зоны авроральной ионизации; второй (резкий вечерний спад  $f_oF2$ , см. п. 2.2) — со смещением ГИП.

На рис. 6, а, б для Северного полушария показаны изменения широт аврорального овала, экваториальной границы электронных высыпаний (внутренней кромки плазменного слоя), дна ГИП и высокоширотного минимума ПЭС на меридиане  $120^\circ$  E. Широта внутренней кромки плазменного слоя определялась по модели [Kamide, Winningham, 1977]; широта дна ГИП — по эмпирической модели, разработанной специально для Восточной Азии [Жеребцов и др., 1986], в которой широта ГИП зависит от местного времени и  $K_p$ -индекса. Координаты границ овала были доступны на сайте [[http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/ovation/ovation\\_display.html](http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/ovation/ovation_display.html)]. Широта минимума ПЭС оценивалась по меридиональным профилям, построенным по его значениям, приведенным на сайте [[http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp\\_public](http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public)] с широтным разрешением  $2.5^\circ$ .

Следует обратить внимание на сходство тенденций изменения широты структур, показанных на рис. 6, а также на значительное различие между широтами дна ГИП и минимума ПЭС в максимуме S2006. Это различие можно объяснить сильным экваториальным смещением электроджетов относи-

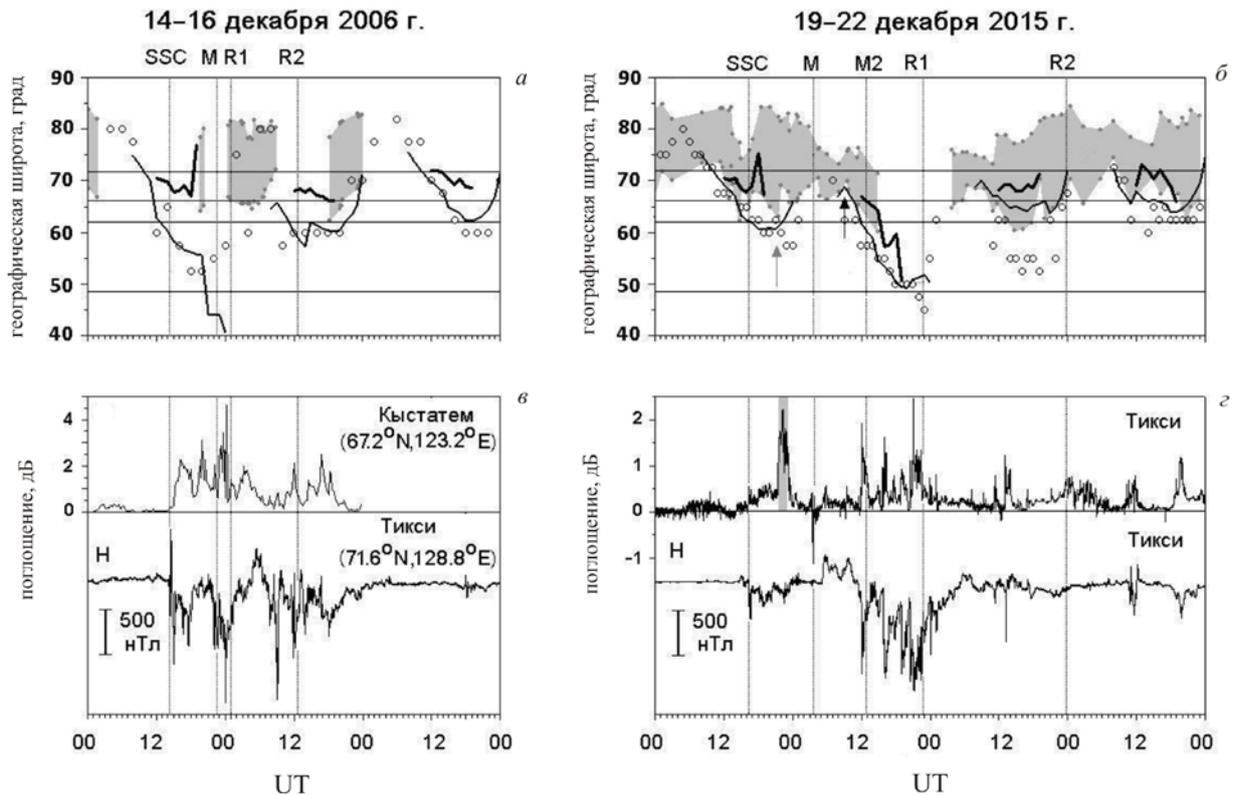


Рис. 6. Изменения географической широты экваториальной границы зоны диффузных высыпаний (толстая линия), ГИП (тонкая линия), минимума ПЭС (кружки) и аврорального овала (серая фигура и точки) на меридиане 120° E для S2006 (а) и S2015 (б). Горизонтальные линии отмечают (сверху вниз) широты ст. «Тикси», «Жиганск», «Якутск» и «Хабаровск». Вариации ионосферного поглощения и магнитного поля в высоких широтах во время S2006 (в) и S2015 (г). Графики поглощения взяты для S2006 из [Zolotukhina et al., 2012]; для S2015 на сайте [http://geophys.aari.ru/real\_rio\_arc.htm]. Здесь *H* — направленная на магнитный полюс компонента геомагнитного поля. Значения *H* за 2006 г. доступны на [http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/mm210]; за 2015 г. — на [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp\_public]

тельно стандартных АЕ-станций, показанным в [Zolotukhina et al., 2012]. Такое смещение приводит к заниженной оценке авроральной активности (АЕ-индекса) и завышенной оценке планетарной активности ( $K_p$ -индекса) [Kamide, Maltsev, 2007; Levitin et al., 2012]. На рис. 1, а смещение джетов относительно стандартной АЕ-зоны проявилось в нарушении подобия между изменениями АЕ- и PCN-индексов и в низких значениях АЕ-индекса в главную фазу S2006.

Графики на рис. 6 показывают, что перед незапными началами S2006 и S2015 дно ГИП находилось, соответственно, южнее ст. «Якутск» и между ст. «Жиганск» и «Якутск». Это объясняет наличие спорадических слоев над обеими станциями, а также нарушение условий распространения КВ-радиоволн на трассах Магадан — Иркутск и Норильск — Иркутск перед началами бурь. Основываясь на этом, мы полагаем, что разная реакция субавроральной ионосферы на начальные фазы бурь, отмеченная в п. 2.4.1, обусловлена не сдвигом зоны авроральных высыпаний (во время SSC она уже находилась над наблюдательными пунктами), а разной интенсивностью потоков авроральных частиц, активизирующих ударную ионизацию во время скачков  $P_{sw}$ . В разделе 1 показано, что корпускулярная энергия источников авроральных частиц (симметричного кольцевого тока и плазменного слоя) была перед началом S2006 больше, чем перед началом S2015. В

событии S2006 дополнительная ионизация была вызвана солнечными протонами [Tereshchenko et al., 2007; Zolotukhina et al., 2012]. Усиление потоков высыпающихся частиц сопровождалось ростом поглощения космического радиоизлучения (см. рис. 6, в), указывающим на рост электронной концентрации в D-области ионосферы.

В разделе 2 отмечено, что резкое падение электронной плотности (отрицательное возмущение) в полуденно-вечернем секторе наблюдалось только в конце первой ступени главной фазы S2015. Prölss et al. [1991] связывают этот эффект с уменьшением широты ГИП. На рис. 6, б начало резкого падения  $f_oF2$  на ст. «Якутск» (09:00 UT 20 декабря) отмечено черной стрелкой. Оно соответствует началу наиболее глубокого смещения ГИП в средние широты. Из модели [Жеребцов и др., 1986] следует, что возмущения, связанные с уменьшением широты ГИП, могли появиться на ст. «Жиганск» до 10:00 UT, а на ст. «Якутск» до 12:00 UT, что соответствует времени наблюдения этих эффектов, указанному в п. 2.2. Отсутствие «срыва суточного хода» в бурю 14–16 декабря 2006 г. объясняется низкой исходной широтой ГИП, находившегося перед SSC южнее ст. «Якутск».

Судя по графикам, приведенным на рис. 6, б, г, смещение ГИП происходило синхронно со смещениями аврорального овала и внутренней кромки плаз-

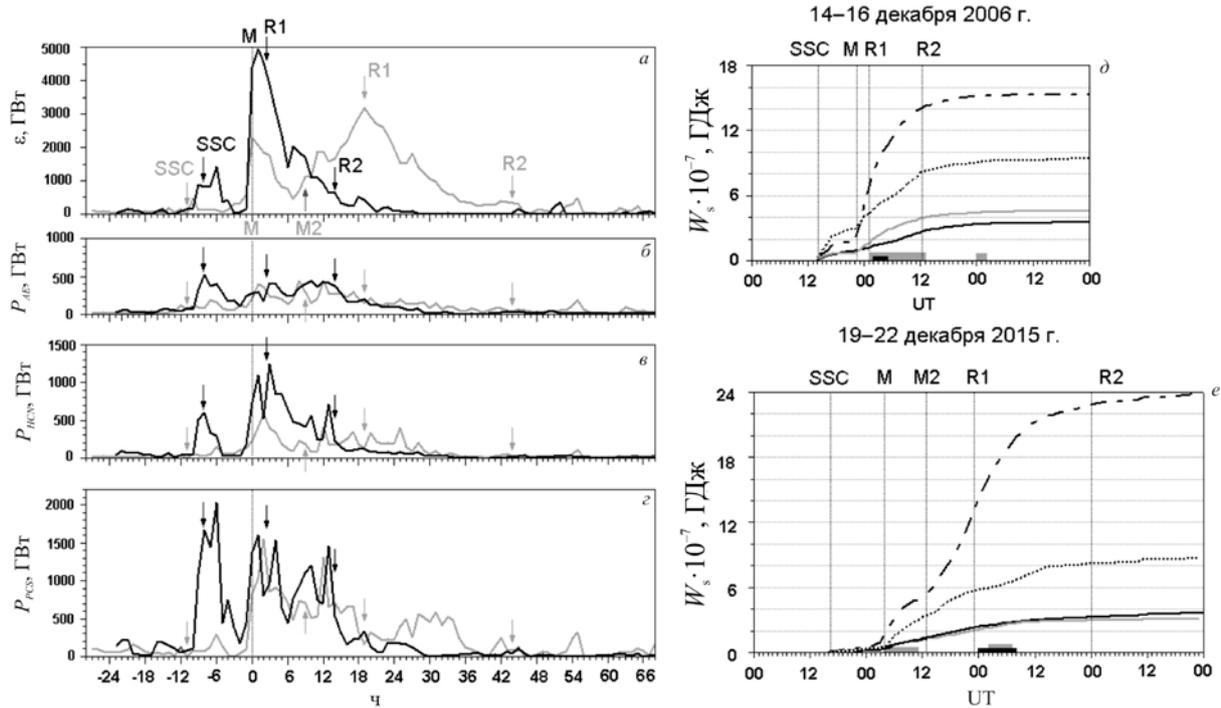


Рис. 7. Вариации: *a* — параметра Акасофу ( $\epsilon$ ); *b–г* — мощности нагрева высокоширотной атмосферы, вычисленной по *AE* ( $P_{AE}$ ), *PCN* ( $P_{PCN}$ ) и *PCS* ( $P_{PCS}$ ) индексам. Нулевой час на оси абсцисс соответствует началу главных фаз бурь. Черные стрелки отмечают начала фаз бури 14–16 декабря 2006 г.; серые — начала фаз бури 19–22 декабря 2015 г. На панелях *d, e* приведены графики изменений суммарной энергии ( $W_s$ ), поступившей в магнитосферу и затраченной на нагрев атмосферы. Штрихпунктирная, черная, серая и пунктирная линии показывают изменения  $W_s$ , вычисленные по параметру Акасофу, *AE*-, *PCN*- и *PCS*-индексам соответственно. Серые прямоугольники на оси абсцисс отмечают интервалы наблюдения положительных ионосферных возмущений на ст. «Хабаровск»; черные — отрицательных ионосферных возмущений на ст. «Якутск»

менного слоя. В это время на авроральной станции «Тикси» наблюдались бухтообразные уменьшения *H*-компоненты магнитного поля, сопровождавшиеся характерными для явлений типа суббури усилениями риометрического поглощения [Дриацкий, 1974]. Исключением является самый высокий пик поглощения, выделенный на рис. 6, *г* серым прямоугольником. Этот пик, наблюдавшийся на ст. «Тикси» около 22:00 UT, совпадает по времени с кратковременным уменьшением широты аврорального овала на  $\sim 5^\circ$  (отмечено на рис. 6, *б* серой стрелкой) и синхронными пиками *AE*-, *PCN*- и *PCS*-индексов, но не связан с заметным изменением *H*-компоненты (рис. 6, *г*, нижняя панель).

Обсудим особенности дневных и вечерних эффектов ионосферных бурь, вызванных, согласно [Prölss et al., 1991], крупномасштабными возмущениями термосферного ветра, изменением химического состава атмосферы и ПИВ. Известно, что главной причиной дневных положительных и отрицательных возмущений является нагрев высокоширотной атмосферы электроджетами и авроральными частицами. Нагрев вызывает возмущения термосферного ветра, в том числе усиление его меридиональной компоненты (причина положительного дневного возмущения  $f_oF2$ ), и изменение химического состава термосферы, в частности уменьшение отношения  $[O]/[N_2]$  (причина отрицательного дневного возмущения  $f_oF2$ ) [Prölss, 2006; Mendillo, 2006;

Dmitriev et al., 2017]. При импульсном нагреве возникают ПИВ, распространяющиеся из высоких широт в сторону экватора [Buonsanto, 1999]. Суперпозиция ПИВ может проявиться в виде продолжительного крупномасштабного увеличения  $f_oF2$  [Prölss et al., 1991].

Геоэффективность межпланетных драйверов обычно определяют по параметру Акасофу [Akasofu, 1981]. Мощность высокоширотных источников нагрева можно оценить по значениям *AE*-индекса [Baumjohann, Kamide, 1984], а также *PCN*- и *PCS*-индексов [Chun et al., 2002]. Графики изменений параметра Акасофу в ходе двух бурь показаны на рис. 7, *a*; вариации мощностей источников высокоширотного нагрева, рассчитанных по значениям *AE*-, *PCN*-, *PCS*-индексов, — на рис. 7, *б–г* соответственно. Графики построены с часовым разрешением. Нулевой час соответствует началу главной фазы каждой бури.

Видно, что средние мощности межпланетного драйвера и высокоширотных источников нагрева в начальную, главную и раннюю восстановительную фазы S2015 были в 1.5 и 2–3 раза (по разным оценкам) меньше, чем в случае S2006. Однако из-за различия в продолжительности главных и ранних восстановительных фаз к началу поздней восстановительной фазы в систему магнитосфера — ионосфера поступило в случае S2015 в 1.5 раза больше энергии из межпланетной среды, чем в случае S2006. Сравнивая графики на рис. 7, *d* и *e*, видим, что это не

привело к заметным различиям в оценках энергии, затраченной на нагрев атмосферы в течение рассматриваемых бурь.

В обоих случаях оценка затраченной на нагрев атмосферы энергии, полученная по значениям *PCS*-индекса, примерно в два раза больше аналогичных оценок, полученных по значениям *AE*- и *PCN*-индексов. Это соответствует хорошо известному эффекту преобладания летне-зимней термосферной циркуляции, приводящему к сильному расширению области усиленного меридионального ветра и переносимой им области измененного состава атмосферы в сторону зимнего полушария [Fuller-Rowell et al., 1997]. В рассматриваемых нами случаях этот эффект наиболее ярко проявился 21 декабря, в раннюю восстановительную фазу бури.

На рис. 8, *a* и *b* приведены черно-белые карты широтно-долготного распределения отношения  $[O]/[N_2]$  за 21 и, для сравнения, за 20 декабря 2015 г. Цветные оригиналы карт доступны на сайте [<http://guvitimed.jhuapl.edu/guvi-gallery13on2>]. На них показано распределение  $[O]/[N_2]$  только в широтной зоне  $-80-35^\circ N$ . Под картами приведены графики распределения ПЭС (рис. 8, *в*, *г*) вдоль меридиана  $120^\circ E$  в 06:30 UT соответствующего дня. Возвращаясь к рис. 4 и 7, *e*, видим, что в эти моменты на ионосферных станциях, размещенных в Восточной Азии, наблюдались положительные ионосферные возмущения. Линии со стрелками показывают, что в 06:30 UT 20 и 21 декабря спутник TIMED, данные которого используются для построения карт, пролетал вблизи меридиана  $120^\circ E$ .

На карте, приведенной на рис. 8, *a*, видна трансэкваториальная область низких значений отношения  $[O]/[N_2] < 0.4$ . Соответствующий карте меридиональный профиль ПЭС (рис. 8, *в*) резко асимметричен относительно экватора. Сравнивая карты и профили ПЭС, приведенные на рис. 8, *a-г*, видим, что за сутки северная граница области низких значений  $[O]/[N_2]$  на меридиане  $120^\circ E$  сместилась с  $\sim 30^\circ S$  до  $\sim 15^\circ N$ , а область низких значений ПЭС расширилась от  $\sim 60^\circ S$  до  $\sim 20^\circ N$ . За это время на широтах  $30-55^\circ N$  образовался платообразный участок повышенного ПЭС, а в высоких широтах Северного полушария — слабо выраженная, по сравнению с южной, область относительно низких значений ПЭС, простирающаяся до  $\sim 60^\circ N$ . Заметим, что в дневные часы 20 декабря на всех рассмотренных нами станциях наблюдались только положительные ионосферные возмущения, что соответствует профилю ПЭС на рис. 8, *г* и указывает на то, что основной вклад в генерацию этих возмущений внес усиленный меридиональный ветер, направленный с севера на юг. В отличие от этого, ионосферные возмущения, развивавшиеся в дневные часы 21 декабря, возникли под влиянием по меньшей мере двух процессов — усиления термосферных ветров, дующих с севера на юг и с юга на север, и изменения состава атмосферы, наиболее ярко проявившегося в Южном полушарии. Дополнительным фактором, усилившим северо-южную асимметрию ионосферных возмущений, была западная ориентация азимутальной компоненты ММП. При таком направлении  $B_y$  ММП авроральные электроджеты,

вызывающие джоулев нагрев атмосферы, более интенсивны в Южном полушарии [Velichko et al., 2002].

Мы считаем, что преобладающее влияние нагрева атмосферы в летнем полушарии на развитие ионосферных возмущений проявилось также в широтном распределении ПЭС, представленном на рис. 8, *д* (для 02:00 UT 15 декабря 2006 г.). По данным зондирования, в это время в высоких широтах Северного полушария развивалось отрицательное ионосферное возмущение. Экваториальная граница возмущения находилась южнее Якутска (см. п. 2.3). Однако на рис. 8, *д* низкие по сравнению с фоновыми значения ПЭС видны только на широтах  $-87.5-7.5^\circ N$ , т. е. в Южном полушарии и в окрестности экватора. Плохое качество карт пространственного распределения отношения  $[O]/[N_2]$  за 14–16 декабря 2006 г. (приведены на указанном сайте только для Южного полушария) не позволяет нам однозначно связать область низких значений ПЭС с областью измененного состава атмосферы.

Вернемся к рис. 7, *д* и *e*. На осях абсцисс этих рисунков отмечены интервалы наблюдения отрицательных и положительных ионосферных возмущений на станциях вертикального зондирования «Якутск» и «Хабаровск» соответственно. Видно, что к началам ионосферных возмущений 15 декабря 2006 г. и 21 декабря 2015 г. суммарная энергия, поступившая в магнитосферно-ионосферную систему с момента SSC, превысила уровни  $7 \cdot 10^7$  и  $13 \cdot 10^7$  ГДж соответственно. Напомним, что эти возмущения развивались на фоне резко асимметричного относительно экватора меридионального распределения ПЭС. Сравнивая значения энергий, затраченных на нагрев атмосферы, видим, что, по трем разным оценкам, к моменту начала возмущений 15 декабря 2006 г. на нагрев ушло примерно в 1.5 раза меньше тепла, чем к началу возмущений 21 декабря 2015 г.

В заключение кратко обсудим особенности волнообразных возмущений  $f_oF_2$ . В п. 2.3 мы отметили, что авторы работы [Lei et al., 2008], основываясь на данных ионозондов вертикального зондирования и результатах модельных расчетов, пришли к выводу, что волнообразные ионосферные возмущения, наблюдавшиеся 15 декабря 2006 г., связаны с ПИВ, которые возбуждались в высоких широтах Северного и Южного полушарий. Детальный анализ экспериментальных данных, использованных в работе [Lei et al., 2008], показал, что задержки между появлением волнообразных возмущений на разнесенных станциях отсутствуют. Такой же результат был получен при анализе волновых возмущений, наблюдавшихся 19–22 декабря 2015 г. Более того, волнообразные ионосферные возмущения с периодами 1.5–2 ч наблюдались как перед бурями, так и в течение бурь и только усиливались в окрестности утреннего меридиана.

#### 4. ВЫВОДЫ

Выявленные общие особенности откликов ионосферы над Восточной Азией на магнитные бури 14–16 декабря 2006 г. и 19–22 декабря 2015 г., которые

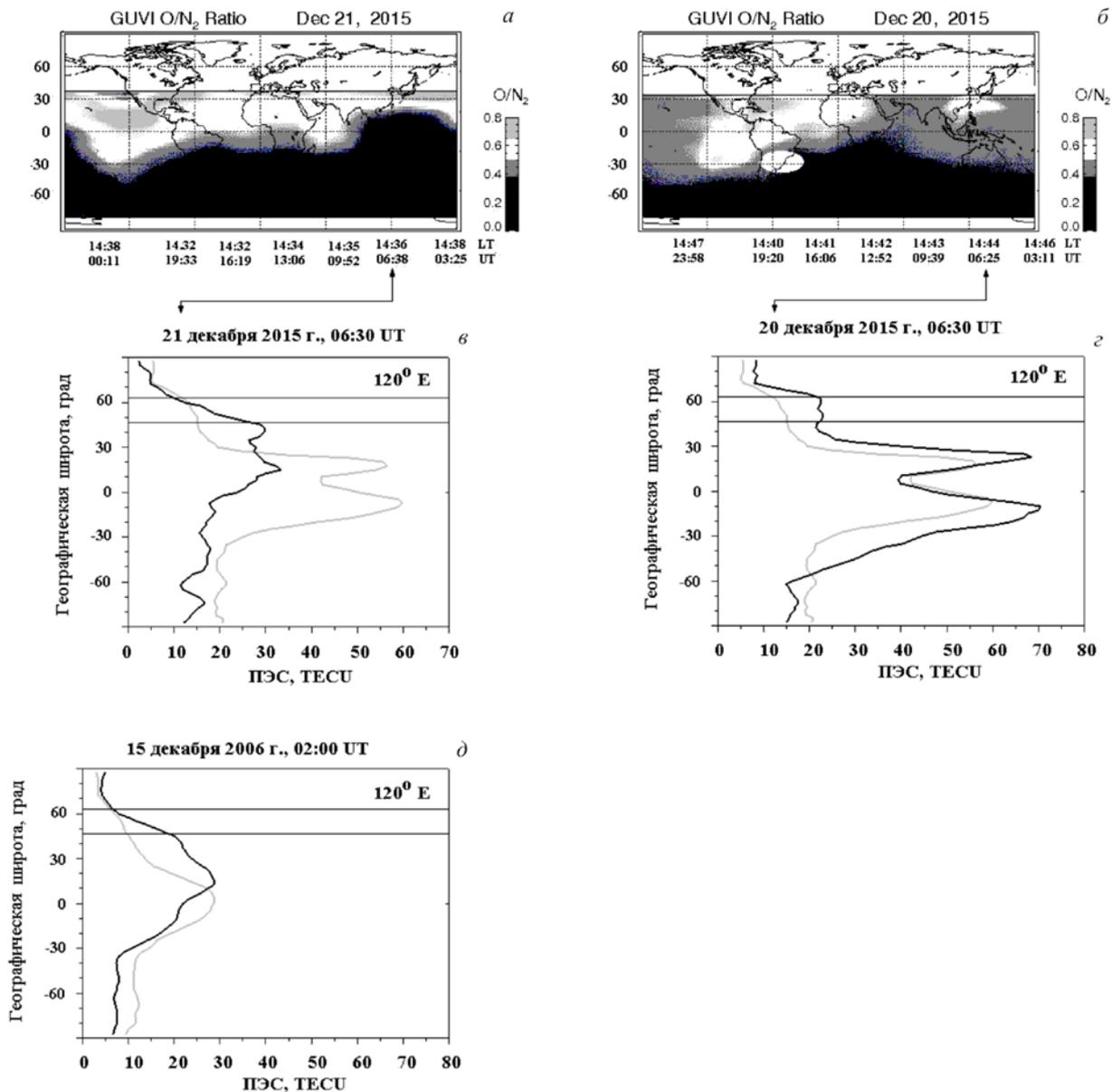


Рис. 8. Воспроизведенные в черно-белой гамме карты распределения отношения  $[O]/[N_2]$ , взятые на сайте [\[http://guvitimed.jhuapl.edu/guvi-gallery13on2\]](http://guvitimed.jhuapl.edu/guvi-gallery13on2) (а, б), и меридиональные профили ПЭС (в, з), построенные для 06:30 UT 15 (серые линии), 20 и 21 декабря (черные линии) близко ко времени пролета спутника TIMED вдоль меридиана  $120^\circ$  E. Широтное распределение ПЭС вдоль меридиана  $120^\circ$  E (д). Горизонтальные линии на графиках профилей ПЭС показывают широты ст. «Якутск» и «Хабаровск»

были одинаковы по сезону, близки по часу начала и интенсивности, но заметно различались по продолжительности главных фаз, обусловлены сезонной динамикой ионосферных бурь. Обнаруженные различия в откликах ионосферы на магнитные бури связаны, в первую очередь, с различиями предбуревых состояний магнитосферно-ионосферной системы и продолжительностей главных фаз. Оценки энергии, вносимой межпланетными драйверами в магнитосферно-ионосферную систему во время начальных, главных и ранних восстановительных фаз бурь, и энергии, затраченной на нагрев атмосферы, показали, что зимне-летняя асимметрия термосферной циркуляции является одним из основных факторов, определивших динамику ветра и повли-

явших на генерацию и распространение ионосферных возмущений. Это обусловило различие откликов ионосферы на рассмотренные магнитные бури, развивавшиеся в одинаковых сезонных условиях. В событии S2015 зимне-летняя асимметрия ионосферно-термосферных возмущений была усилена из-за интенсивного джоулева нагрева, происходившего в высоких широтах Южного полушария при отрицательной азимутальной компоненте ММП.

Работа выполнена в рамках государственного задания на 2018 г. № 007-00163-18-00 от 12.01.2018 и частичной поддержке гранта N 16-05-00563 Российского фонда фундаментальных исследований. В работе использованы экспериментальные данные, полученные с использованием оборудования ЦКП

«Ангара», <http://ckp-rf.ru/ckp/3056>. Авторы признательны Институту космофизических исследований и аэронавтики СО РАН им. Ю.Г. Шафера за предоставление магнитных и ионосферных данных, Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO), Центру мониторинга над территорией Российской Федерации (ЦМГГФО РФ), National Institute of Information and Communications Technology (NICT) и администрации сайтов [<http://ulcar.uml.edu/DIDBase>; <http://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/ISDJ/index-E.html>] за предоставление данных вертикального зондирования. Авторы благодарят NASA/GSFC's Space Physics Data Facility's [[https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp\\_public](https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public)] за предоставление информации о параметрах межпланетного магнитного поля и *SYM-H*-индексе, а также данных о полном электронном содержании, полученных с помощью системы глобального позиционирования (GPS), администрацию сайтов [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>] и [<http://pc-index.org>] за информацию о *PCN*-, *PCS*- и *K<sub>p</sub>*-индексах. Авторы выражают благодарность John Hopkins University Applied Physics Laboratory [<http://guvitimed.jhuapl.edu>] за предоставление данных по отношению  $[O]/[N_2]$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
- Дриацкий В.М. Природа аномального поглощения космического радиоизлучения в нижней ионосфере высоких широт. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 224 с.
- Жеребцов Г.А., Пирог О.М., Разуваев О.И. Структура и динамика высокоширотной ионосферы // Исследования по геомагнетизму, аэронавтике и физике Солнца. 1986. Вып. 76. С. 165–177.
- Романова Е.Б., Тащилин А.В. Моделирование структурных особенностей распределения концентрации электронов в плазмосфере // Солнечно-земная физика. 2013. Т. 22. С. 21–23.
- Тащилин А.В., Романова Е.Б. Моделирование свойств плазмосферы при спокойных и возмущенных условиях // Геомагнетизм и аэронавтика. 2014. Т. 54, № 1. С. 13–22. DOI: [10.7868/S0016794014010167](https://doi.org/10.7868/S0016794014010167).
- Akasofu S.I. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere // Space Sci. Rev. 1981. V. 28. P. 121–190.
- Bargatze L.F., Baker D.N., McPherron R.L., Hones E.V. Magnetospheric impulse response for many levels of geomagnetic activity // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 6387–6394. DOI: [10.1029/JA090iA07p06387](https://doi.org/10.1029/JA090iA07p06387).
- Baumjohann W., Kamide Y. Hemispherical Joule heating and the *AE* indices // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. P. 383–388.
- Borovsky J.E., Denton M.H. Solar wind turbulence and shear: A superposed-epoch analysis of corotating interaction regions at 1 AU // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A10101. DOI: [10.1029/2009JA014966](https://doi.org/10.1029/2009JA014966).
- Borries C., Mahrous A.M., Ellahouy N.M., Badeke R. Multiple ionospheric perturbations during the Saint Patrick's Day storm 2015 in the European-African sector // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2016. V. 121. P. 11333–11345. DOI: [10.1002/2016JA023178](https://doi.org/10.1002/2016JA023178).
- Buonsanto M.J. Ionospheric storms — a review // Space Sci. Rev. 1999. V. 88. P. 563–601. DOI: [10.1023/A:1005107532631](https://doi.org/10.1023/A:1005107532631).
- Chen Z., Wang J.-S., Huang C.-M., Huang L.-F. A new pair of indices to describe the relationship between ionospheric disturbances and geomagnetic activity // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2014. V. 119. P. 10156–10163. DOI: [10.1002/2014JA020438](https://doi.org/10.1002/2014JA020438).
- Chun F.K., Knipp D.J., McHard M.G., Lacey J.R. Joule heating patterns as a function of polar cap index // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. N A7. P. 1119. DOI: [10.1029/2001JA000246](https://doi.org/10.1029/2001JA000246).
- Clauer C.R., Cai X., Welling D., et al. Characterizing the 18 April 2002 storm-time sawtooth events using ground magnetic data // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. A04S90. DOI: [10.1029/2005JA011099](https://doi.org/10.1029/2005JA011099).
- Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Klimenko M.V., et al. Predictable and unpredictable ionospheric disturbances during St. Patrick's Day magnetic storms of 2013 and 2015 and on 8–9 March 2008 // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2017. V. 122. P. 2398–2423. DOI: [10.1002/2016JA023260](https://doi.org/10.1002/2016JA023260).
- 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. P. 18639–18654.
- Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Roble R.G., Richmond A.D. How does the thermosphere and ionosphere react to a geomagnetic storm? // Magnetic Storms / Eds. B.T. Tsurutani, W.D. Gonzalez, Y. Kamide, J.K. Arballo. Washington, 1997. P. 203–226. (AGU Monograph. V. 98). DOI: [10.1029/GM098](https://doi.org/10.1029/GM098).
- Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Lepping R.P., Schwenn R. Interplanetary phenomena associated with very intense geomagnetic storms // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2002. V. 64. P. 173–181.
- Gonzalez W.D., Echer E., Tsurutani B.T., et al. Interplanetary origin of intense, superintense and extreme geomagnetic storms // Space Sci. Rev. 2011. V. 158. P. 69–89. DOI: [10.1007/s11214-010-9715-2](https://doi.org/10.1007/s11214-010-9715-2).
- Goodman J.M. Space Weather & Telecommunications. New York: Springer, 2005. 382 p.
- Huang C.M. Disturbance dynamo electric fields in response to geomagnetic storms occurring at different universal times // J. Geophys. Res. 2013. V. 118. P. 5149–5156. DOI: [10.1029/2012JA018118](https://doi.org/10.1029/2012JA018118).
- Kalita B.R., Hazarika R., Kakoti G., et al. Conjugate hemisphere ionospheric response to the St. Patrick's Day storms of 2013 and 2015 in the 100° E longitude sector // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2016. V. 121. P. 11364–11390. DOI: [10.1002/2016JA023119](https://doi.org/10.1002/2016JA023119).
- Kamide Y., Winningham J.D. A statistical study of the “instantaneous” night side auroral oval: the equatorial boundary of electron precipitation as observed by the Isis-1 and 2 satellites // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. P. 5573–5585. DOI: [10.1029/JA082i035p05573](https://doi.org/10.1029/JA082i035p05573).
- Kamide Y., Maltsev Y.P. Geomagnetic storms // Handbook of the Solar-Terrestrial Environment. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. P. 355–374. DOI: [10.1007/11367758\\_14](https://doi.org/10.1007/11367758_14).
- 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.
- Lee D.-Y., Lyons L.R., Yumoto K. Sawtooth oscillations directly driven by solar wind dynamic pressure enhancements // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. A04202. DOI: [10.1029/2003JA010246](https://doi.org/10.1029/2003JA010246).
- Lei J., Burns A.G., Tsugawa T., et al. Observations and simulations of quasiperiodic ionospheric oscillations and large-scale traveling ionospheric disturbances during the December 2006 geomagnetic storm // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. A06310. DOI: [10.1029/2008JA013090](https://doi.org/10.1029/2008JA013090).
- Levitin A.E., Gromova L.L., Gromov S.V., Dremukhina L.A. *K<sub>p</sub>*-index and local high-latitude geomagnetic activity // Proc. the 9th International Conference “Problems of Geocosmos”. Saint-Petersburg, Petrodvorets, October 8–12, 2012. Saint-Petersburg, 2012. P. 295–300.
- 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](https://doi.org/10.1002/2015JA021832).
- Marmet P. New digital filter for the analysis of experimental data // Rev. Sci. Instrum. 1979. 50. P. 79–83.

Mendillo M. Storms in the ionosphere: patterns and processes for total electron content // *Rev. Geophys.* 2006. V. 44. RG4001. DOI: [10.1029/2005RG000193](https://doi.org/10.1029/2005RG000193).

Pirog O.M., Polekh N.M., Zhrebtsov G.A., et al. Seasonal variations of the ionospheric effects of geomagnetic storms at different latitudes of East Asia // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37. P. 1075–1080.

Prölss G.W., Brace L.H., Mayr H.G., et al. Ionospheric storm effects at subauroral latitudes: a case study // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. A2. P. 1275–1288.

Prölss G.W. Ionospheric F-region storms: unsolved problems characterising the Ionosphere: Meeting Proceedings RTO-MP-IST-056, Paper 10. Neuilly-sur-Seine, France: RTO, 2006. P. 10-1–10-20. Available from: <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp> (дата обращения 25 апреля 2018 г.).

Rodger A.S., Wrenn G.L., Rishbeth H. Geomagnetic storms in the Antarctic F-region. II. Physical interpretation // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1989. V. 51. P. 851–866.

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.

Tereshchenko V.D., Vasiljev E.B., Ogloblina O.F., et al. The response of the polar lower ionosphere to powerful solar flares on December 5–14, 2006 // *Physics of Auroral Phenomena: Proc. XXX Annual Seminar. Apatity, 2007*. P. 196–198.

Troshichev O.A., Kotikov A.L., Bolotinskaya B.D., Andreev V.G. Influence of the IMF azimuthal component on magnetospheric substorm dynamics // *J. Geomag. Geoelectr.* 1986. V. 38. P. 1075–1088.

Troshichev O.A., Janzhura A.S., 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](https://doi.org/10.1029/2005JA011402).

Tsurutani B.T., Gonzalez W.D. The interplanetary causes of magnetic storms: a review // *Magnetic storms* / Eds. B.T. Tsurutani, W.D. Gonzalez, Y. Kamide, J.K. Arballo. Washington, 1997. P. 77–89. (AGU Monograph. V. 98). DOI: [10.1029/GM098](https://doi.org/10.1029/GM098).

Tsurutani B.T., Echer E., Shibata K., et al. The interplanetary causes of geomagnetic activity during the 7–17 March 2012 interval: a CAWSES II overview // *J. Space Weather and Space Climate*. 2014. V. 4. A02. DOI: [10.1051/swsc/2013056](https://doi.org/10.1051/swsc/2013056).

Velichko V.A., Boroyev R.N., Gelberg M.G., et al. North-south asymmetry of the substorm intensity depending on the IMF  $B_y$ -component // *Earth, Planets and Space*. 2002. V. 54, N 10. P. 955–961. DOI: [10.1186/BF03352443](https://doi.org/10.1186/BF03352443).

Wang J.-S., Chen Z., Huang C.-M. A method to identify aperiodic disturbances in the ionosphere // *Ann. Geophys.* 2014. V. 32. P. 563–569. DOI: [10.5194/angeo-32-563-2014](https://doi.org/10.5194/angeo-32-563-2014).

Yue C., Zong Q.G., Zhang H., et al. Geomagnetic activity triggered by interplanetary shocks // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115, A00I05. DOI: [10.1029/2010JA015356](https://doi.org/10.1029/2010JA015356).

Zhang S.-R., Zhang Y., Wang W., Verkhoglyadova O.P. Geospace system responses to the St. Patrick's Day storms in 2013 and 2015 // *J. Geophys. Res.* 2017. V. 122. P. 6901–6906. DOI: [10.1002/2017JA024232](https://doi.org/10.1002/2017JA024232).

Zhou X., Tsurutani B.T. Interplanetary shock triggering of nighttime geomagnetic activity: substorms, pseudobreakups, and quiescent events // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 18957–18967. DOI: [10.1029/2000JA003028](https://doi.org/10.1029/2000JA003028).

Zolotukhina N., Polekh N., Kurkin V., et al. Magnetospheric disturbances associated with the 13 December 2006 solar flare and their ionospheric effects over North-East Asia // *Adv. Space Res.* 2012. V. 49. P. 883–897.

URL: [https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp\\_public](https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public) (дата обращения 11 ноября 2016).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html> (дата обращения 21 января 2018).

URL: [http://www.solen.info/solar/old\\_reports](http://www.solen.info/solar/old_reports) (дата обращения 2 ноября 2016).

URL: [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list) (дата обращения 31 мая 2016).

URL: [http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/ovation/ovation\\_display.html](http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/ovation/ovation_display.html) (дата обращения 6 декабря 2017).

URL: [http://geophys.aari.ru/real\\_rio\\_arc.htm](http://geophys.aari.ru/real_rio_arc.htm) (дата обращения 25 января 2018).

URL: <http://guvitimed.jhuapl.edu/guvi-gallery13on2> (дата обращения 12 апреля 2018).

URL: <http://ulcar.uml.edu/DIDBase> (дата обращения 12 апреля 2018).

URL: <http://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/ISDJ/index-E.html> (дата обращения 12 апреля 2018).

URL: <http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/mm210> (дата обращения 12 апреля 2018).

URL: <http://pc-index.org> (дата обращения 12 апреля 2018).

URL: <http://guvitimed.jhuapl.edu> (дата обращения 12 апреля 2018).

## REFERENCES

Akasofu S.I. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere // *Space Sci. Rev.* 1981. V. 28. P. 121–190.

Bargatze L.F., Baker D.N., McPherron R.L., Hones E.V. Magnetospheric impulse response for many levels of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.* 1985, vol. 90, pp. 6387–6394. DOI: [10.1029/JA090iA07p06387](https://doi.org/10.1029/JA090iA07p06387).

Baumjohann W., Kamide Y. Hemispherical Joule heating and the AE indices. *J. Geophys. Res.* 1984, vol. 89, pp. 383–388.

Borovsky J.E., Denton M.H. Solar wind turbulence and shear: A superposed-epoch analysis of corotating interaction regions at 1 AU. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A10101. DOI: [10.1029/2009JA014966](https://doi.org/10.1029/2009JA014966).

Borries C., Mahrous A.M., Ellahouny N.M., Badeke R. Multiple ionospheric perturbations during the Saint Patrick's Day storm 2015 in the European-African sector. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016, vol. 121, pp. 11333–11345. DOI: [10.1002/2016JA023178](https://doi.org/10.1002/2016JA023178).

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. DOI: [10.1023/A:1005107532631](https://doi.org/10.1023/A:1005107532631).

Chen Z., Wang J.-S., Huang C.-M., Huang L.-F. A new pair of indices to describe the relationship between ionospheric disturbances and geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014, vol. 119, pp. 10156–10163. DOI: [10.1002/2014JA020438](https://doi.org/10.1002/2014JA020438).

Chun F.K., Knipp D.J., McHard M.G., Lacey J.R. Joule heating patterns as a function of polar cap index. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, no. A7, p. 1119. DOI: [10.1029/2001JA000246](https://doi.org/10.1029/2001JA000246).

Clauer C.R., Cai X., Welling D., DeJong A., Henderson M.G. Characterizing the 18 April 2002 storm-time sawtooth events using ground magnetic data. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, A04S90. DOI: [10.1029/2005JA011099](https://doi.org/10.1029/2005JA011099).

Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Rakhmatulin R.A., Parkhomov V.A. Predictable and unpredictable ionospheric disturbances during St. Patrick's Day magnetic storms of 2013 and 2015 and on 8–9 March 2008. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017, vol. 122, pp. 2398–2423. DOI: [10.1002/2016JA023260](https://doi.org/10.1002/2016JA023260).

Driatsky V.M. *Priroda anomal'nogo pogloshcheniya kosmicheskogo radioizlucheniya v nizhnei ionosfere vysokikh shirot* [The Origin of Anomalous Absorption of Cosmic Radio Emission in the Lower Ionosphere at High-Latitudes]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1974. 224 p. (In Russian).

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, pp. 18639–18654.

Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Roble R.G., Richmond A.D. How does the thermosphere and ionosphere react to a geomagnetic storm? *Magnetic Storms*. Washington, 1997, pp. 203–226. (AGU Monograph. vol. 98). DOI: [10.1029/GM098](https://doi.org/10.1029/GM098).

Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Lepping R.P., Schwenn R. Interplanetary phenomena associated with very intense geomagnetic storms. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002, vol. 64, pp. 173–181.

Gonzalez W.D., Echer E., Tsurutani B.T., Clúa de Gonzalez A.L., Dal Lago A. Interplanetary origin of intense, superintense and extreme geomagnetic storms. *Space Sci. Rev.* 2011, vol. 158, pp. 69–89. DOI: [10.1007/s11214-010-9715-2](https://doi.org/10.1007/s11214-010-9715-2).

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

Huang C.M. Disturbance dynamo electric fields in response to geomagnetic storms occurring at different universal times. *J. Geophys. Res.* 2013, vol. 118, pp. 5149–5156. DOI: [10.1029/2012JA018118](https://doi.org/10.1029/2012JA018118).

Kalita B.R., Hazarika R., Kakoti G., Bhuyan P.K., Chakrabarty D., Seemala G.K., Wang K., Sharma S., Yokoyama T., Supnithi P., Komolmis T., Yatini C.Y., Le Huy M., Roy P. Conjugate hemisphere ionospheric response to the St. Patrick's Day storms of 2013 and 2015 in the 100° E longitude sector. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016, vol. 121, pp. 11364–11390. DOI: [10.1002/2016JA023119](https://doi.org/10.1002/2016JA023119).

Kamide Y., Winningham J.D. A statistical study of the “instantaneous” night side auroral oval: the equatorial boundary of electron precipitation as observed by the Isis-1 and 2 satellites. *J. Geophys. Res.* 1977, vol. 82, pp. 5573–5585. DOI: [10.1029/JA082i035p05573](https://doi.org/10.1029/JA082i035p05573).

Kamide Y., Maltsev Y.P. Geomagnetic storms. *Handbook of the Solar-Terrestrial Environment*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2007, pp. 355–374. DOI: [10.1007/11367758\\_14](https://doi.org/10.1007/11367758_14).

King J.H. Solar wind parameters and magnetospheric coupling studies. *Solar Wind — Magnetospheric Coupling*. Tokyo, Terra Scientific Publishing Company, 1986, pp. 163–177.

Lee D.-Y., Lyons L.R., Yumoto K. Sawtooth oscillations directly driven by solar wind dynamic pressure enhancements. *J. Geophys. Res.* 2004, vol. 109, A04202. DOI: [10.1029/2003JA010246](https://doi.org/10.1029/2003JA010246).

Lei J., Burns A.G., Tsugawa T., Wang W., Solomon S.C., Willberger M. Observations and simulations of quasiperiodic ionospheric oscillations and large-scale traveling ionospheric disturbances during the December 2006 geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, A06310. DOI: [10.1029/2008JA013090](https://doi.org/10.1029/2008JA013090).

Levitin A.E., Gromova L.I., Gromov S.V., Dremukhina L.A.  $K_p$ -index and local high-latitude geomagnetic activity. *Proc. the 9<sup>th</sup> International Conference “Problems of Geocosmos”*. Saint-Petersburg, 2012, pp. 295–300.

Liu J., Wang W., Burns A., Yue X., Zhang S., Zhang Y., Huang C. 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](https://doi.org/10.1002/2015JA021832).

Marmet P. New digital filter for the analysis of experimental data. *Rev. Sci. Instrum.* 1979, no. 50, pp. 79–83.

Mendillo M. Storms in the ionosphere: patterns and processes for total electron content. *Rev. Geophys.* 2006, vol. 44, RG4001. DOI: [10.1029/2005RG000193](https://doi.org/10.1029/2005RG000193).

Pirog O.M., Polekh N.M., Zhrebtsov G.A., Smirnov V.F., Shi J., Wang X. Seasonal variations of the ionospheric effects of geomagnetic storms at different latitudes of East Asia. *Adv. Space Res.* 2006, vol. 37, pp. 1075–1080.

Pröls G.W., Brace L.H., Mayr H.G., Carignan G.R., Killeen T.L., Klobuchar J.A. Ionospheric storm effects at subauroral latitudes: a case study. *J. Geophys. Res.* 1991, vol. 96, no. A2, pp. 1275–1288.

Pröls G.W. Ionospheric F-region Storms: Unsolved Problems. *Characterising the Ionosphere: Meeting Proceedings RTO-*

MP-IST-056, Paper 10. Neuilly-sur-Seine, France: RTO, 2006, pp. 10-1–10-20. Available from: <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp> (accessed April 25, 2018).

Rodger A.S., Wrenn G.L., Rishbeth H. Geomagnetic storms in the Antarctic F-region. II. Physical interpretation. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1989, vol. 51, pp. 851–866.

Romanova E.B., Tashchilin A.V. Modeling of structural features of electron density distribution in plasmasphere. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terr. Phys.]. 2013, vol. 22, pp. 21–23. (In Russian).

Sharma A.S., Baker D.N., Borovsky J.E. Nonequilibrium phenomena in the magnetosphere: phase transition, selforganized criticality and turbulence. *Nonequilibrium Phenomena in Plasmas*. Springer, 2005, pp. 3–22.

Tashchilin A.V., Romanova E.B. Modeling of plasmasphere properties under quiet and disturbed conditions. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2014, vol. 54, no. 1, pp. 13–22. (In Russian). DOI: [10.7868/S0016794014010167](https://doi.org/10.7868/S0016794014010167).

Tereshchenko V.D., Vasiljev E.B., Ogloblina O.F., Tereshchenko V.A., Chernyakov S.M. The response of the polar lower ionosphere to powerful solar flares on December, 5–14, 2006. *Physics of Auroral Phenomena: Proc. XXX Annual Seminar*. Apatity, 2007, pp. 196–198.

Troshichev O.A., Kotikov A.L., Bolotinskaya B.D., Andrezen V.G. Influence of the IMF azimuthal component on magnetospheric substorm dynamics. *J. Geomag. Geoelectr.* 1986, vol. 38, pp. 1075–1088.

Troshichev O.A., Janzhura A.S., 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](https://doi.org/10.1029/2005JA011402).

Tsurutani B.T., Gonzalez W.D. The interplanetary causes of magnetic storms: a review. *Magnetic storms*. Washington, 1997, pp. 77–89. (AGU Monograph. vol. 98). DOI: [10.1029/GM098](https://doi.org/10.1029/GM098).

Tsurutani B.T., Echer E., Shibata K., Verkhoglyadova O.P., Mannucci A.J., Gonzalez W.D., Pätzold M. The interplanetary causes of geomagnetic activity during the 7–17 March 2012 interval: a CAWSES II overview. *J. Space Weather and Space Climate*. 2014, vol. 4, A02. DOI: [10.1051/swsc/2013056](https://doi.org/10.1051/swsc/2013056).

Velichko V.A., Boroyev R.N., Gelberg M.G., Baishev D.G., Olson J.V., Morris R.J., Yumoto K. North-south asymmetry of the substorm intensity depending on the IMF  $B_z$ -component. *Earth, Planets and Space*. 2002, vol. 54, no. 10, pp. 955–961. DOI: [10.1186/BF03352443](https://doi.org/10.1186/BF03352443).

Wang J.-S., Chen Z., Huang C.-M. A method to identify aperiodic disturbances in the ionosphere. *Ann. Geophys.* 2014, vol. 32, pp. 563–569. DOI: [10.5194/angeo-32-563-2014](https://doi.org/10.5194/angeo-32-563-2014).

Yue C., Zong Q.G., Zhang H., Wang Y.F., Yuan C.J., Pu Z.Y., Fu S.Y., Lui A.T.Y., Yang B., Wang C.R. Geomagnetic activity triggered by interplanetary shocks. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A00I05. DOI: [10.1029/2010JA015356](https://doi.org/10.1029/2010JA015356).

Zhang S.-R., Zhang Y., Wang W., Verkhoglyadova O.P. Geospace system responses to the St. Patrick's Day storms in 2013 and 2015. *J. Geophys. Res.* 2017, vol. 122, pp. 6901–6906. DOI: [10.1002/2017JA024232](https://doi.org/10.1002/2017JA024232).

Zhebtsov G.A., Pirog O.M., Razuvayev O.I. The high-latitude ionosphere structure and dynamics. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Research on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics]. 1986, is. 76, pp. 165–177.

Zhou X., Tsurutani B.T. Interplanetary shock triggering of nightside geomagnetic activity: substorms, pseudobreakups, and quiescent events. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, pp. 18957–18967. DOI: [10.1029/2000JA003028](https://doi.org/10.1029/2000JA003028).

Zolotukhina N., Polekh N., Kurkin V., Pirog O., Samsonov S., Moiseyev A. Magnetospheric disturbances associated with the 13 December 2006 solar flare and their ionospheric effects over North-East Asia. *Adv. Space Res.* 2012, vol. 49, pp. 883–897.

URL: [https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp\\_public](https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public) (accessed November 11, 2016).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html> (accessed January 21, 2018).

URL: [http://www.solen.info/solar/old\\_reports](http://www.solen.info/solar/old_reports) (accessed November 2, 2016).

URL: [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list) (accessed May 31, 2016).

URL: [http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/ovation/ovation\\_display.html](http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/ovation/ovation_display.html) (accessed December 6, 2017).

URL: [http://geophys.aari.ru/real\\_rio\\_arc.htm](http://geophys.aari.ru/real_rio_arc.htm) (accessed January 25, 2018).

URL: <http://guvitimed.jhuapl.edu/guvi-gallery13on2> (accessed April 12, 2018).

URL: <http://ulcar.uml.edu/DIDBase> (accessed April 12, 2018).

URL: <http://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/ISDJ/index-E.html> (accessed April 14, 2016).

URL: <http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/mm210> (accessed April 12, 2018).

URL: <http://pc-index.org> (accessed April 12, 2018).

URL: <http://guvitimed.jhuapl.edu> (accessed April 12, 2018).

*Как цитировать эту статью*

Золотухина Н.А., Куркин В.И., Полех Н.М. Ионосферные возмущения над Восточной Азией во время сильных декабрьских магнитных бурь 2006 и 2015 гг.: сходство и различие. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 3. С. 39–56. DOI: [10.12737/szf-43201805](https://doi.org/10.12737/szf-43201805).