# Ионосферная долготная изменчивость в северном полушарии во время магнитных бурь по данным ионозондов и GPS/ГЛОНАСС

## М.А. Черниговская, Б.Г. Шпынев, А.С. Ясюкевич, Д.С. Хабитуев

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664033, Россия E-mail: cher@iszf.irk.ru

Проанализированы долготно-временные вариации параметров среднеширотной ионосферы над Евразийским континентом на основе анализа данных сети ионозондов во время двух самых сильных магнитных бурь текущего 24-го цикла солнечной активности — в марте и июне 2015 г. Регистрируемые ионосферные эффекты проявляют выраженную долготную неоднородность, связанную с наличием долготных особенностей фоновой структуры и вариаций геомагнитного поля. Установленные по данным вертикального зондирования особенности долготных вариаций ионизации ионосферы в периоды магнитных бурь подтверждены данными измерений цепей двухчастотных фазовых приёмников GPS/ГЛОНАСС. По данным пространственно-временного распределения вертикального полного электронного содержания подтверждены высказанные ранее предположения о формировании над Канадой зоны интенсивных отрицательных ионосферных возмущений в периоды магнитных бурь. Эти долготные неоднородности ионизации формируются в зоне усиленного проникновения возмущений геомагнитного поля из высоких широт в средние на долготах ~45 и ~135° з.д. и в направлении меридиана геомагнитного полюса вблизи ~90° з.д.

**Ключевые слова:** цепь ионозондов, цепь двухчастотных фазовых приёмников GPS/ГЛОНАСС, ионосферные возмущения, вариации геомагнитного поля, геомагнитная буря

Одобрена к печати: 05.08.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-269-281

### Введение

Целью работы стало экспериментальное исследование пространственно-временных вариаций параметров ионосферы, связанных с возмущениями в магнитосфере Земли, которые определяются в первую очередь проявлениями солнечной активности (Dudok de Wit, Watermann, 2009; Kamide, Balan, 2016; Prölss, 1995). Ионосфера как ионизированная часть атмосферы является очень важной областью в системе взаимодействия Солнце – Земля. В периоды магнитных бурь в ионосфере развивается целый комплекс сложных процессов (так называемые ионосферные бури), в результате которых существенно изменяются её параметры и, как следствие, условия распространения радиоволн. Данные ионосферных измерений (наземных и спутниковых) наряду с результатами моделирования являются инструментами для получения этих знаний. Накопленные более чем за девяносто лет данные наземных радиофизических измерений, а также относительно новые методы спутниковых измерений атмосферных и ионосферных параметров представляют научный базис для современного понимания процессов ионосферных бурь.

В последнее время достигнут гигантский прогресс в развитии систем спутникового дистанционного зондирования. Спутниковые данные являются эффективным инструментом для изучения глобальных средних распределений полей ионосферных и атмосферных параметров, и поэтому они активно используются для построения глобальных моделей ионосферы и атмосферы. Зондирование со спутников позволяет наблюдать обширные океанические, приполярные и горные районы, которые остаются почти неохваченными наземными методами зондирования атмосферы и ионосферы. Следует особо подчеркнуть роль спутникового зондирования, дающего неоценимую информацию для осуществления текущей диагностики и прогноза состояния околоземного космического пространства, включая прогнозирование различных чрезвычайных ситуаций. Активно развиваются исследования ионосферы на основе технологии зондирования сигналами ГНСС (спутниковая система навигации, GNSS -Global Navigation Satellite System) (Dow et al., 2009), наиболее распространены GPS (Global Positioning System — система глобального позиционирования) и ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система). Данная технология позволяет непрерывно получать сведения о вариациях полного электронного содержания, отражающего состояние плазмы во всей толще ионосферы. Глобальная ГНСС-сеть, состоящая из более 5000 приёмников GPS/ГЛОНАСС, образует густую сеть информационных датчиков. Эта сеть приёмников может быть использована как глобальный ионосферный детектор, характеризующийся непрерывностью наблюдений и высокой пространственно-временной чувствительностью, что позволяет получать новые сведения об ионосферных процессах (Афраймович, Перевалова, 2006; Afraimovich et al., 2013; Jin et al., 2011; Hernandez-Pajares et al., 2011; Mannucci et al., 1998). Известно, что надёжность функционирования ГНСС, имеющей огромное практическое и научное значение, сильно зависит от ионосферных возмущений (Афраймович, Перевалова, 2006; Afraimovich et al., 2013). Научное сообщество прилагает значительные усилия для поддержки работы ГНСС, разрабатывая модели, обеспечивающие получение (с необходимой точностью) профиля электронной плотности от нижней ионосферы до высоты орбит ГНСС и её интеграла, который известен как полное электронное содержание (ПЭС) (Jakowski et al., 2011; Mannucci et al., 1998; Yasyukevich et al., 2015). Однако эти усилия встречают ряд осложнений. Основная трудность связана с отсутствием прямых наблюдений профиля электронной плотности вдоль полного пути от нижней ионосферы до плазмосферы.

Однако использование спутниковых данных для изучения локальных особенностей проявления быстроразвивающихся событий с ограниченными пространственными и временными масштабами бывает весьма затруднительным ввиду низкого пространственного и временного разрешения этих данных. По этой причине наземные инструменты, работающие с высоким временным разрешением в режиме непрерывного мониторинга, позволяют получить более объективную информацию о развитии динамических процессов в большом диапазоне высот атмосферы и ионосферы над конкретным географическим регионом. В связи с этим выполнение регулярных наземных измерений не теряет своей актуальности. Ещё большую научную ценность приобретают сети измерительных приборов (предпочтительно одной технической модификации) с возможностью длительной синхронной регистрации геофизических параметров в обширной области пространства для изучения не только временных, но и пространственных особенностей развития изучаемых процессов.

Старейший и один из основных радиофизических методов исследования структуры и динамики ионосферы — метод вертикального зондирования (ВЗ) с помощью ионозондов, расположенных на поверхности Земли (Reinisch, 1996). Ионозонды предназначены для диагностики состояния ионосферы и оперативного прогноза коротковолновой радиосвязи. С их помощью можно проводить измерения амплитудных и фазовых характеристик, а также спектра принятого сигнала, определять скорость дрейфа ионосферной плазмы и ряд других параметров. Функционирует мировая сеть станций ВЗ, насчитывающая в настоящее время порядка 130 ионозондов. В последние десятилетия методы радиозондирования ионосферы претерпевают революционные изменения, связанные с переходом на высокочастотные радиосистемы с полностью цифровой обработкой как излучаемого, так и принимаемого сигнала, что позволяет развивать более совершенные системы управления зондированием и вторичной обработки данных.

Способность ионозондов систематически с высокой точностью проводить прямые измерения, которые могут быть использованы для целей мониторинга состояния ионосферы, а также для верификации других экспериментальных методов и моделей, широко признана исследовательским сообществом.

Исследование ионосферных эффектов магнитосферных бурь в настоящей работе выполнено на основе данных цепей ионозондов и приёмников GPS/ГЛОНАСС, расположенных в северном полушарии примерно на одинаковых широтах, но разнесённых по долготе, т.е. анализируются долготные вариации параметров ионосферы.

#### Данные радиофизических измерений ионосферных параметров

В настоящей работе используются:

- данные о среднечасовых значениях критической частоты f<sub>o</sub>F2 ионосферы по измерениям цепи из 8 среднеширотных ионозондов, расположенных в диапазоне широт 50–60° с. ш. с интервалом 15–20° по долготе в секторе 13–158° в. д. Евразийского континента;
- данные о значениях ПЭС по измерениям на средне- и высокоширотной цепях двухчастотных фазовых приёмников GPS/ГЛОНАСС (*таблица*);
- данные средне- и высокоширотной цепей магнитометров глобальной сети INTERMAGNET (Черниговская и др., 2019; Шпынев и др., 2017).

Среднеширотная цепь состоит из 15 приёмников GPS/ГЛОНАСС в диапазоне широт 50–55° с.ш. (*рис. 1a*, зелёные флажки, см. с. 272). Высокоширотная цепь — из 13 приёмников GPS/ГЛОНАСС в диапазоне широт 60–70° с.ш. (см. *рис. 1a*, красные флажки).

№ п/п	Приёмники GPS/GLONASS	Географически	ие координаты
		Широта	Долгота
Средние широты ~55° с. ш.			
1	hert	50,9	0,3
2	lama	53,9	20,7
3	zwe2	55,7	36,8
4	artu	58,6	56,4
5	novm	55,0	82,9
6	irkj	52,2	104,3
7	yssk	47,0	142,7
8	pets	53,0	158,7
9	ac60	52,7	174,1
10	ab01	52,2	-174,2
11	holb	50,6	-128,1
12	sask	52,2	-106,4
13	dubo	50,3	-95,9
14	kuuj	55,3	-77,7
15	stj2	47,6	-52,7
Высокие широты ~70° с. ш.			
1	vaas	63,0	21,8
2	nril	69,4	88,4
3	tixi	71,6	128,9
4	mag0	59,6	150,8
5	ab04	63,7	-170,6
6	fair	65,0	-147,5
7	invk	68,3	-133,5
8	yell	62,5	-114,5
9	bake	64,3	-96,0
10	iqal	63,8	-68,5
11	qaq1	60,7	-46,0
12	reyk	64,1	-22,0
13	argi	62,0	-6,8

Станции средне- и высокоширотной цепей приёмников GPS/ГЛОНАСС



*Рис. 1.* Схемы расположения: *а* — цепей ионозондов и приёмников GPS/ГЛОНАСС; *б* — ионозондов и магнитометров

Первые исследования на основе данных сети евразийских среднеширотных ионозондов (см. *рис. 1a*, *б*, белые кружки) показали новые интересные результаты о сильных долготных вариациях ионосферных параметров в возмущённых геомагнитных условиях (Черниговская и др., 2019; Шпынев и др., 2017; Shpynev et al., 2015, 2018).

Для восстановления пространственной структуры и временных вариаций геомагнитного поля (ГМП) использовались данные глобальной сети магнитометров INTERMAGNET. Станции геомагнитных наблюдений были разбиты на две цепи: среднеширотную — вдоль ~55° с.ш. (14 магнитометров, см. *рис. 16*, голубые метки) и высокоширотную — вдоль ~70° с.ш. (12 магнитометров, см. *рис. 16*, красные метки). В работах (Черниговская и др., 2019; Шпынев и др., 2017; Shpynev et al., 2015, 2018) приведено подробное описание ионозондов и магнитометров, а также методики обработки рядов исходных экспериментальных данных.

Из схем расположения наземных измерительных станций, данные которых используются в исследовании (см. *puc. 1*), видно, что цепи приёмников GPS/ГЛОНАСС (см. *puc. 1a*) хорошо совпадают по географическому расположению с цепями магнитометров (см. *puc. 1b*) и ионозондов.

### Анализ экспериментальных данных и обсуждение результатов

В работе (Черниговская и др., 2019) были исследованы ионосферные эффекты во время двух самых сильных магнитных бурь текущего 24-го цикла солнечной активности — 17–21 марта и 22–26 июня 2015 г. — на основе анализа данных цепи среднеширотных ионозондов. Обе магнитные бури были «очень сильными» (англ. severe) по классификации бурь по планетарному индексу  $D_{st}$  (Loewe, Prölss, 1997). По классификации НАСА (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, США, англ. NASA — National Aeronautics and Space Administration) бури также относились к классу G4 (https://www.swpc. noaa.gov/noaa-scales-explanation). Подробнее информацию о развитии анализируемых бурь можно посмотреть в работе (Черниговская и др., 2019).

Результаты исследований гелиосферных, магнитосферных и ионосферных возмущений во время этих экстремальных бурь представлены также в публикациях (Astafyeva et al., 2015,

2017, 2018; Klimenko et al., 2018; Kunitsyn et al., 2016; Liu et al., 2018; Shpynev et al., 2018; Wu et al., 2009; Zakharenkova et al., 2016, 2018; Zolotukhina et al., 2017).

В работах (Черниговская и др., 2019; Шпынев и др., 2017; Shpynev et al., 2015, 2018) впервые была выявлена долготная неоднородность ионосферы над регионом Евразии, основная причина которой заключалась в конфигурации ГМП. Предполагается, что нерегулярная структура долготной изменчивости компонент ГМП является следствием пространственных аномалий различных масштабов в фоновом магнитном поле Земли, а также несовпадения магнитного и географического полюсов. На основе данных двух цепей магнитометров сети INTERMAGNET в средних и высоких широтах получены долготные распределения дисперсий *H*- и *Z*-компонент ГМП для рассматриваемых событий магнитных бурь в спокойных и возмущённых условиях (рис. 2). В долготном распределении вариаций ГМП были выделены явно выраженные долготы, на которых интенсивность вариаций имеет максимумы и минимумы (Черниговская и др., 2019; Шпынев и др., 2017; Shpynev et al., 2015, 2018). Максимальные долготные вариации дисперсий наблюдаются в большинстве случаев на средних широтах (вблизи ~55° с. ш.) (см. *рис. 2a*, в). На высоких широтах (вблизи ~70° с. ш.) изменчивость ГМП более равномерна по долготе (см. *рис. 26, г*). Зона сильных вариаций ГМП формируется в направлении меридиана геомагнитного полюса вблизи ~90° з.д. (в географических координатах) как в условиях спокойной, так и возмущённой геомагнитной активности. В североамериканском секторе повышенные вариации ГМП отмечаются также на долготах ~45 и ~135° з.д. (см. *рис. 2a, в*). В магнитовозмущённые периоды в средних широтах над Евразией образуются две зоны сильных вариаций ГМП на долготах ~40 и ~130° в.д. Зоны проникновения геомагнитных возмущений хорошо видны как для равноденствия (см. puc. 2a), так и для солнцестояния (см. puc. 2в). Им соответствуют области сильных отрицательных возмущений ионосферы, т.е. понижения f<sub>c</sub>F2 по сравнению с невозмущёнными условиями, что связано с уменьшением электронной концентрации в максимуме F2-слоя ионосферы. В секторе долгот 80-110° в.д. (зона расположения Восточно-Сибирской континентальной магнитной аномалии), симметричном расположенному в западном полушарии геомагнитному полюсу, уровень вариаций ГМП всегда низкий. В связи с этим над регионом Евразии на долготах ~80-110° наблюдается область повышенной ионизации на высотах F2-области ионосферы и раньше всего происходит восстановление ионизации после геомагнитных возмущений.



*Рис. 2.* Долготно-временные вариации дисперсий *H*- и *Z*-компонент ГМП для магнитных бурь 15–21 марта и 20–26 июня 2015 г. на широтах ~55° с. ш. (*а и в* соответственно) и ~70° с. ш. (*б и г* соответственно); время UT (*англ*. Universal Time, всемирное время)

Цепь среднеширотных ионозондов охватывает только Евразийский континент, и, к сожалению, в западном полушарии на средних широтах Североамериканского континента ионозонды отсутствуют. Однако из долготных распределений вариаций ГМП (см. *puc. 2*) можно предположить, что в североамериканском секторе могут также располагаться области сильных вариаций ионосферных параметров, связанные с зонами усиленного проникновения геомагнитных возмущений на средние широты. В связи с этим для полноты исследования долготных вариаций в средне- и высокоширотной ионосфере северного полушария в условиях возмущённой и спокойной геомагнитной обстановки, связанных с вариациями магнитного поля Земли, в анализ были включены также данные средне- и высокоширотной цепей двухчастотных фазовых приёмников GPS/ГЛОНАСС (см. *рис. 1a*). Расчёт вертикального ПЭС из исходных рядов проводился на основе разработанной модели «абсолютного» ПЭС с учётом дифференциальных кодовых задержек (Yasyukevich et al., 2015).

Рассматриваемые предположения оказались корректными. Данные ПЭС, которые охватывают не только материковую часть Евразии и Северной Америки, но и часть островов в океанах, позволили рассмотреть гораздо больший пространственный и временной масштаб развития ионосферного возмущения, связанного с зональным распространением возмущений концентрации и состава атмосферного газа на высотах термосферы в период фазы восстановления бури.



*Рис. 3.* Долготно-временные вариации  $f_oF2$  по данным среднеширотной цепи Евразийских ионозондов (*a*) и ПЭС по данным среднеширотной цепи приёмников GPS/ГЛОНАСС (*б*) в период бури 15–25 марта 2015 г. (время UT). Вертикальные пунктирные линии отмечают внезапное начало бури (*анел.* sudden storm commencement — SSC)



*Рис. 4.* Долготно-временные вариации  $f_oF2$  по данным среднеширотной цепи Евразийских ионозондов (*a*) и ПЭС по данным среднеширотной цепи приёмников GPS/ГЛОНАСС (*б*) в период бури 20 июня – 2 июля 2015 г. (время UT). Вертикальные пунктирные линии отмечают внезапное начало бури (SSC)

На *рис. 3* и 4 представлены для сравнения долготно-временные вариации, характеризующие ионизацию ионосферы над Евразийским континентом в диапазоне широт 50–60° с.ш. во время бури 17–18 марта 2015 г. (см. *рис. 3*) и бури 22–23 июня 2015 г. (см. *рис. 4*) по данным среднеширотной цепи ионозондов (см. *рис. 3а* и 4*a*) и цепи двухчастотных приёмников GPS/ГЛОНАСС (см. *рис. 36* и 4*6*). Для анализа вариаций ионосферных параметров в периоды развития бурь рассматриваются временные интервалы до наступления полного восстановления ионосферы к невозмущённым условиям. В качестве окончания интервала анализа выбирается время перехода индекса  $D_{st}$  от отрицательных значений к положительным. Следует обратить внимание, что бури происходили в условиях весеннего равноденствия и летнего солнцестояния. Для этих сезонов характерны различные особенности регулярных вариаций ионосферных параметров.

Сравнивая долготно-временные вариации  $f_oF2$  (см. *рис. За* и 4*a*) по данным евразийской цепи среднеширотных ионозондов и вертикального ПЭС (см. *рис. Зб* и 4*б*) по данным среднеширотной цепи приёмников GPS/ГЛОНАСС, можно сделать заключение, что качественно эти распределения достаточно хорошо согласуются.

Используемые для исследования методы радиофизических измерений взаимно дополняют и обогащают друг друга. Метод ВЗ позволяет детально анализировать пространственновременные особенности развития ионосферных возмущений. Метод зондирования ионосферы сигналами спутников GPS/ГЛОНАСС, дающий интегральные характеристики ионосферы, предоставляет возможность эффективно исследовать глобальные особенности развития ионосферных возмущений. Метод зондирования ионосферы, предоставляет возможность эффективно исследовать глобальные особенности развития ионосферных неоднородностей. Интегральное ПЭС включает в себя вклад области выше максимума ионизации, где ионозонды не проводят измерения. Однако для случая рассматриваемых сильных геомагнитных возмущений чаще всего происходят глобальные изменения в структуре силовых линий ГМП, поэтому оба метода будут показывать сходные вариации, что и следует из приведённых на *рис. 3 и 4* результатов. По этой причине далее в наших исследованиях мы можем использовать данные по вариациям ПЭС для описания глобальных долготных неоднородностей ионосферы в областях, где отсутствуют ионозонды, как продолжение ряда данных наземных ионозондовых измерений.

Для обеих рассматриваемых экстремальных бурь полная длительность ионосферного возмущения составляла ~9 сут. Разница воздействия на ионосферу состояла только в фоновых условиях ионосферы. В марте существует выраженный переход от дневных условий к ночным (см. *рис. 3*). В июне такой переход выражен очень слабо (см. *рис. 4*), поскольку на высотах ионосферы Солнце в этот период практически не заходит.

Для объяснения наблюдаемых различий в картинах долготно-временных вариаций  $f_oF2$  и ПЭС следует также учесть тот факт, что анализируемые события ионосферных возмущений происходили в условиях весеннего равноденствия и летнего солнцестояния. Совместный анализ данных Иркутского радара некогерентного рассеяния и данных ПЭС GPS (Shpynev, Khabituev, 2014) показал, что вклад электронов плазмосферы в ПЭС может составлять 30-50 % в летний и равноденственный сезоны. Зимой, при отсутствии источников ионизации в нижней ионосфере, суммарная ионизация плазмосферы невелика, и F2-слой целиком образуется в пределах небольшого диапазона высот 200–400 км.

Рассмотрим более детально глобальные пространственно-временные вариации ПЭС для средних и высоких широт северного полушария (*puc. 5 и 6*, см. с. 276). По мере роста магнитной возмущённости изменчивость ионизации меньше в высоких широтах (см. *puc. 56 и 66*), чем в средних (см. *puc. 5a и 6a*). Этот эффект отмечался также в работе (Araujo-Pradere et al., 2005).

Из карт долготно-временных вариаций ПЭС (см. *рис. 5 и 6*) можно отметить, что долготные различия в вариациях ПЭС между восточным и западным полушариями в периоды анализируемых экстремальных бурь 2015 г. проявляются очень ярко.

В предыдущих работах (Черниговская и др., 2019; Шпынев и др., 2017; Shpynev et al., 2018) при анализе ионосферных эффектов бури в марте 2015 г. по данным цепи евразийских ионозондов было показано, что во время главной фазы бури формируется область низкой ионизации, которая в течение трёх дней в период фазы восстановления перемещается из зоны основного возмущения на долготе ~130° в. д. на запад (см. *рис. 3a*). Такой ионосферный эффект является весьма продолжительным во времени. Однако на *рис. 5 и 6* видно, что в североамериканском секторе ионосферный эффект обеих магнитных бурь наблюдается гораздо дольше. Области низкой ионизации сохраняются на средних и высоких широтах в течение 7–8 дней после начала бурь. Особенно отчётливо этот эффект проявляется на долготах  $\sim$ 50–150° з. д. Следует подчеркнуть, что этот долготный интервал охватывает зоны усиленных вариаций ГМП в западном полушарии в периоды ѕповышения магнитной возмущённости (см. *puc. 2a*).



*Рис. 5.* Долготно-временные вариации ПЭС по данным среднеширотной (*a*) и высокоширотной (*б*) цепей приёмников GPS/ГЛОНАСС в период бури 15–25 марта 2015 г. (время UT). Вертикальные пунктирные линии отмечают внезапное начало бури (SSC)



*Рис. 6.* Долготно-временные вариации ПЭС по данным среднеширотной (*a*) и высокоширотной (*б*) цепей приёмников GPS/ГЛОНАСС в период бури 20 июня – 2 июля 2015 г. (время UT). Вертикальные пунктирные линии отмечают внезапное начало бури (SSC)

При обсуждении ионосферных эффектов над территорией Евразии по данным цепи ионозондов подчёркивалось, что на 4—5-й день после начала обеих магнитных бурь ионосфера уже восстанавливалась (см. *рис. 3 и 4*). Причём восстановление начиналось в долготном секторе ~80—110° в.д., где, как отмечалось ранее, уровень вариаций ГМП на средних широтах низкий (см. *рис. 2a и в*). По аналогии, как и предполагалось, на меридианах ~0 и ~180° между зонами усиленного проникновения возмущений ГМП на средние широты в восточном и западном полушариях находятся зоны с относительно низким уровнем вариаций ГМП (см. *рис. 2a и в*). В них, как и в долготном секторе ~80—110° в.д., восстановление ионосферы начиналось раньше, чем на долготах ~50—150° з.д., где отмечалось очень длительное существование области низкой ионизации (см. *рис. 5 и 6*).

Следует также отметить, что при восстановлении ионосферы наблюдались величины ионизации, превышающие значения в спокойные дни перед началом магнитного возмущения (Klimenko et al., 2018; Ratovsky et al., 2018). Особенно ярко этот эффект проявился в равноденствие на средних широтах в период бури в марте 2015 г. (см. *рис. За* и *5а*).

### Выводы

Исследование ионосферного отклика на экстремальные геомагнитные бури в марте и июне 2015 г. на основе анализа данных цепей ионозондов, приёмников GPS/ГЛОНАСС на средних и высоких широтах северного полушария позволило сделать следующие выводы.

Регистрируемые ионосферные эффекты проявляют выраженную долготную неоднородность, связанную с наличием долготных особенностей фоновой структуры и вариаций ГМП.

Во время главной фазы бури долготная динамика геомагнитных и ионосферных возмущений получается почти синхронной в высоких и средних широтах и связана с глобальным перемещением зоны магнитосферной конвекции с высоких широт на средние.

В североамериканском секторе наблюдаются более интенсивные и продолжительные отрицательные ионосферные возмущения в периоды магнитных бурь, связанные с зоной сильных вариаций ГМП, формирующихся в направлении меридиана геомагнитного полюса вблизи ~90° з.д. и на долготах ~45 и ~135° з.д.

Над регионом Евразии на долготах  $\sim 80-110^{\circ}$  в.д. наблюдается область повышенной ионизации на высотах *F*2-области ионосферы и раньше всего происходит восстановление ионизации после геомагнитных возмущений ввиду низкого уровня вариаций ГМП в этом долготном секторе.

Комплексный подход к исследованию вариаций параметров ионосферы средних и высоких широт северного полушария с использованием данных ионозондов и приёмников GPS/ГЛОНАСС позволил установить, что глобальные ионосферные эффекты в периоды развития магнитных бурь проявляют выраженную долготную неоднородность. Эти долготные вариации могут быть связаны с наличием долготных особенностей фоновой структуры и вариаций ГМП, а также с крупномасштабными динамическими процессами в нейтральной термосфере в периоды бурь.

Используемые методы радиофизических измерений взаимно дополняют и обогащают друг друга. Если метод ВЗ позволяет детально анализировать пространственно-временные особенности развития ионосферных возмущений (высотная структура возмущения, «сумеречный» эффект, образование спорадических слоёв Es, определение времени прохождения главного ионосферного провала через местоположение ионозонда), то метод зондирования ионосферы сигналами спутников GPS/ГЛОНАСС, дающий интегральные характеристики ионосферы, предоставляет возможность эффективно исследовать глобальные особенности развития ионосферных неоднородностей.

Результаты комплексного исследования ионосферных эффектов экстремальных магнитных бурь 2015 г., представленные в настоящей работе, дают основание полагать, что совместный анализ пространственно-временных распределений ПЭС по данным цепей двухчастотных фазовых приёмников GPS/ГЛОНАСС, расположенных вдоль всего широтного круга, вместе с данными среднеширотной цепи Евразийских ионозондов позволит нам в дальнейшем более детально исследовать ионосферные эффекты магнитных бурь в глобальном масштабе в регионе средних и высоких широт северного полушария.

Работа частично выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-05-00681). Методы программной обработки данных получены в рамках базового финансирования программ фундаментальных научных исследований II.12 и II.16 (Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН)). Экспериментальные данные частично получены с использованием оборудования центра коллективного пользования «Ангара» (ИСЗФ СО РАН).

## Литература

- 1. *Афраймович Э.Л. Перевалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
- 2. Черниговская М.А., Шпынев Б.Г., Хабитуев Д.С., Ратовский К.Г., Белинская А.Ю., Степанов А.Е., Бычков В.В., Григорьева С.А., Панченко В.А., Коуба Д., Мелич Й. Долготные вариации ионосферных и геомагнитных параметров в северном полушарии во время сильных магнитных бурь 2015 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 336–347. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-336-347.
- 3. Шпынев Б. Г., Золотухина Н.А., Полех Н. М., Черниговская М.А., Ратовский К.Г., Белинская А.Ю., Степанов А. Е., Бычков В. В., Григорьева С.А., Панченко В.А., Коренькова Н.А., Мелич Й. Исследование ионосферного отклика на сильную геомагнитную бурю в марте 2015 года по данным евразийской цепи ионозондов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 235–248. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-235-248.
- Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Demyanov V. V., Edemskiy I. K., Gavrilyuk N. S., Ishin A. B., Kosogorov E. A., Leonovich L. A., Lesyuta O. S., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P., Polyakova A. S., Smolkov G. Y., Voeykov S. V., Yasyukevich Y. V., Zhivetiev I. V. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena // J. Space Weather Space Climate. 2013. V. 3. No. A27. DOI: 10.1051/swsc/2013049.
- 5. *Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Bilitza D.* Characteristics of the ionospheric variability as a function of season, latitude, local time, and geomagnetic activity // Radio Science. 2005. V. 40. RS5009. DOI: 10.1029/2004RS003179.
- 6. *Astafyeva E., Zakharenkova I., Förster M.* Ionospheric response to the 2015 St. Patrick–s Day storm: A global multi-instrumental overview // J. Geophysical Research Space Physics. 2015. V. 120. P. 9023–9037. DOI: 10.1002/2015JA021629.
- 7. Astafyeva E., Zakharenkova I., Huba J. D., Doornbos E., van den Ijssel J. Global Ionospheric and thermospheric effects of the June 2015 geomagnetic disturbances: Multi-instrumental observations and modeling // J. Geophysical Research Space Physics. 2017. V. 122. P. 11716–11742. DOI: 10.1002/2017JA024174.
- 8. Astafyeva E., Zakharenkova I., Hozumi K., Alken P., Coïsson P., Hairston M. R., Coley W. R. Study of the equatorial and low-latitude electrodynamic and ionospheric disturbances during the 22–23 June 2015 geomagnetic storm using ground-based and spaceborne techniques // J. Geophysical Research Space Physics. 2018. V. 123. P. 2424–2440. DOI: 10.1002/2017JA024981.
- 9. *Dow J. M.*, *Neilan R. E.*, *Rizos C*. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // J. Geodesy. 2009. V. 83. P. 191–198. DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3.
- 10. *Dudok de Wit T., Watermann J.* Solar forcing of the terrestrial atmosphere // Comptes Rendus Geoscience. 2009. V. 342. No. 4–5. P. 259–272. DOI: 10.1016/j.crte.2009.06.001.
- Hernandez-Pajares M., Juan M.J., Sanz J., Aragon-Angel A., Garcia-Rigo A., Salazar D., Escudero M. The ionosphere: effects, GPS modeling and the benefits for space geodetic techniques // J. Geodesy. 2011. V. 85. P. 887–907. DOI: 10.1007/s00190-011-0508-5.
- 12. Jakowski N., Mayer C., Hoque M. M., Wilken V. Total electron content models and their use in ionosphere monitoring // Radio Science. 2011. V. 46. RS0D18. DOI: 10.1029/2010RS004620.
- 13. Jin S., Feng G. P., Gleason S. Remote sensing using GNSS signals: Current status and future directions // Advances in Space Research. 2011. V. 47. P. 1645–1653. DOI: 10.1016/j.asr.2011.01.036.
- 14. *Kamide Y., Balan N.* The importance of ground magnetic data in specifying the state of magnetosphere–ionosphere coupling: a personal view // Geoscience Letters. 2016. V. 3. No. 10. DOI: 10.1186/ s40562-016-0042-7.
- Klimenko M. V., Klimenko V. V., Despirak I. V., Zakharenkova I. E., Kozelov B. V., Cherniakov S. M., Andreeva E. S., Tereshchenko E. D., Vesnin A. M., Korenkova N. A., Gomonov A. D., Vasiliev E. B., Ratovsky K. G. Disturbances of the thermosphere-ionosphere-plasmasphere system and auroral electrojet at 30°E longitude during the St. Patrick–s Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015 // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2018. V. 180. P. 78–92. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.12.017.
- Kunitsyn V. E., Padokhin A. M., Kurbatov G. A., Yasyukevich Yu. V., Morozov Yu. V. Ionospheric TEC estimation with the signals of various geostationary navigational satellites // GPS Solution. 2016. V. 20. P. 877–884. DOI: 10.1007/s10291-015-0500-2.
- 17. *Liu Y., Fu L., Wang J., Zhang C.* Studying Ionosphere Responses to a Geomagnetic Storm in June 2015 with Multi-Constellation Observations // Remote Sensing. 2018. V. 10. P. 666–686. DOI: 10.3390/rs10050666.
- Loewe C.A., Prölss G. W. Classification and mean behavior of magnetic storms // J. Geophysical Research. 1997. V. 102. No. A7. P. 14209–14213.
- 19. *Mannucci A. J.*, *Wilson B. D.*, *Yuan D. N.*, *Ho C. H.*, *Lindqwister U. J.*, *Runge T. F.* A global mapping technique for GPS-derived ionospheric TEC measurements // Radio Science. 1998. V. 33. No. 3. P. 565–582. DOI: 10.1029/97RS02707.

- 20. *Prölss G. W.* Ionospheric F-region storms // Handbook of atmospheric electrodynamics / ed. Volland H. Boca Raton, U.S.: CRC Press, 1995. P. 195–248.
- Ratovsky K. G., Klimenko M. V., Klimenko V. V., Chirik N. V., Korenkova N. A., Kotova D. S. After-effects of geomagnetic storms: statistical analysis and theoretical explanation // Solar-Terrestrial Physics. 2018. V. 4. No. 4. P. 26–32. DOI: 10.12737/stp-44201804.
- 22. *Reinisch B. W.* Modern Ionosondes // Modern Ionospheric Science / eds. Kohl H., Rüster R., Schlegel K.; European Geophysical Society. Berlin, Germany, 1996. P. 440–458.
- Shpynev B. G., Khabituev D. S. Estimation of the plasmasphere electron density and O<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> transition height Irkutsk incoherent scatter data and GPS total electron content // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2014. V. 119. P. 223–228. DOI: 10.1016/j.jastp.2014.01.007.
- 24. Shpynev B. G., Kurkin V. I., Ratovsky K. G., Chernigovskaya M. A., Belinskaya A. Yu., Grigorieva S. A., Stepanov A. E., Bychkov V. V., Pancheva D., Mukhtarov P. High-midlatitude ionosphere response to major stratospheric warming // Earth, Planets and Space. 2015. V. 67. 10 p. DOI: 10.1186/s40623-015-0187-1.
- Shpynev B. G., Zolotukhina N.A., Polekh N. M., Ratovsky K. G., Chernigovskaya M.A., Belinskaya A. Yu., Stepanov A. E., Bychkov V. V., Grigorieva S. A., Panchenko V. A., Korenkova N. A., Mielich J. The ionosphere response to severe geomagnetic storm in March 2015 on the base of the data from Eurasian high-middle latitudes ionosonde chain // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2018. V. 180. P. 93–105. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.10.014.
- 26. *Wu X.*, *Hu X.*, *Gong X.*, *Zhang X.*, *Wang X.* Analysis of inversion errors of ionospheric radio occultation // GPS Solution. 2009. V. 13. No. 3. P. 231–239. DOI: 10.1007/s10291-008-0116-x.
- 27. *Yasyukevich Yu. V., Mylnikova A.A., Polyakova A.S.* Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data // Results Physics. 2015. V. 5. P. 32–33. DOI: 10.1016/j.rinp.2014.12.006.
- Zakharenkova I., Astafyeva E., Cherniak I. GPS and GLONASS observations of large-scale traveling ionospheric disturbances during the 2015 St. Patrick–s Day storm // J. Geophysical Research Space Physics. 2016. V. 121. P. 12138–12156. DOI: 10.1002/2016JA023332.
- Zakharenkova I. E., Cherniak Iu. V., Shagimuratov I. I., Klimenko M. V. Features of High-Latitude Ionospheric Irregularities Development as Revealed by Ground-Based GPS Observations, Satellite-Borne GPS Observations and Satellite In Situ Measurements over the Territory of Russia during the Geomagnetic Storm on March 17–18, 2015 // Geomagnetism Aeronomy. 2018. V. 58. No. 1. P. 70–82. DOI: 10.1134/S0016793217050176.
- Zolotukhina N., Polekh N., Kurkin V., Rogov D., Romanova E., Chelpanov M. Ionospheric effects of St. Patrick-s storm over Asian Russia: 17–19 March 2015 // J. Geophysical Research Space Physics. 2017. V. 122. P. 2484–2504. DOI: 10.1002/2016JA023180.

# lonospheric longitudinal variability in the Northern Hemisphere during magnetic storm from ionosonde and GPS/GLONASS data

#### M.A. Chernigovskaya, B.G. Shpynev, A.S. Yasyukevich, D.S. Khabituev

#### Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk 664033, Russia E-mail: cher@iszf.irk.ru

Longitudinal-temporal variations of the parameters of the mid-latitude ionosphere over the Eurasian continent are analyzed using the ionosonde chain data recieved during the two strongest magnetic storms of the current  $24^{th}$  solar activity cycle — in March and June 2015. The recorded ionospheric effects exhibit pronounced longitudinal inhomogeneity associated with the presence of longitudinal features background structure and variations of the geomagnetic field. The features of longitudinal variations of ionization of the ionosphere during magnetic storms, established from vertical sounding data, are confirmed by the measurement data of the chains of GPS/GLONASS dual frequency phase receivers. According to the spatio-temporal distribution of the vertical total electronic content, the previously made assumptions about the formation of a zone of intense negative ionospheric disturbances over Canada during periods of magnetic storms are confirmed. These longitudinal ionization inhomogeneities are formed in the zone of enhanced penetration of geomagnetic field disturbances from high latitudes to middle ones at longitudes of ~45° and ~135° W and in the direction of the meridian of the geomagnetic pole near ~90° W.

**Keywords:** ionosonde chain, chain of GPS/GLONASS dual frequency phase receivers, ionospheric disturbances, geomagnetic field variations; geomagnetic storm

Accepted: 05.08.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-269-281

## References

- 1. Afraimovich E. L., Perevalova N. P., *GPS-monitoring verkhnei atmosfery Zemli* (GPS-monitoring of the Earth upper atmosphere), Irkutsk, 2006, 480 p.
- Chernigovskaya M. A., Shpynev B. G., Khabituev D. S., Ratovsky K. G., Belinskaya A. Yu., Stepanov A. E., Bychkov V.V., Grigorieva S. A., Panchenko V. A., Kouba D., Mielich J., Dolgotnye variatsii ionosfernykh i geomagnitnykh parametrov v severnom polusharii vo vremya sil'nykh magnitnykh bur' 2015 g. (Longitudinal variations of geomagnetic and ionospheric parameters during severe magnetic storms in 2015), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 336– 347, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-336-347.
- Shpynev B. G., Zolotukhina N.A., Polekh N. M., Chernigovskaya M.A., Ratovsky K. G., Belinskaya A. Yu., Stepanov A. E., Bychkov V. V., Grigorieva S. A., Panchenko V. A., Korenkova N. A., Mielich J., Issledovanie ionosfernogo otklika na sil'nuyu geomagnitnuyu buryu v marte 2015 goda po dannym evraziiskoi tsepi ionozondov (Studying the ionosphere response to severe geomagnetic storm in March 2015 according to Eurasian ionosonde chain), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 235–248, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-235-248.
- 4. Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Demyanov V. V., Edemskiy I. K., Gavrilyuk N. S., Ishin A. B., Kosogorov E. A., Leonovich L. A., Lesyuta O. S., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P., Polyakova A. S., Smolkov G. Y., Voeykov S. V., Yasyukevich Y. V., Zhivetiev I. V., A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena, *J. Space Weather Space Climate*, 2013, Vol. 3, No. A27, DOI: 10.1051/swsc/2013049.
- 5. Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Bilitza D., Characteristics of the ionospheric variability as a function of season, latitude, local time, and geomagnetic activity, *Radio Science*, 2005, Vol. 40, RS5009, DOI: 10.1029/2004RS003179.
- 6. Astafyeva E., Zakharenkova I., Förster M., Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview, *J. Geophysical Research Space Physics*, 2015, Vol. 120, pp. 9023–9037, DOI: 10.1002/2015JA021629.
- Astafyeva E., Zakharenkova I., Huba J. D., Doornbos E., van den Ijssel J., Global Ionospheric and thermospheric effects of the June 2015 geomagnetic disturbances: Multi-instrumental observations and modeling, J. Geophysical Research Space Physics, 2017, Vol. 122, P. 11716–11742, DOI: 10.1002/2017JA024174.
- Astafyeva E., Zakharenkova I., Hozumi K., Alken P., Coïsson P., Hairston M. R., Coley W. R., Study of the equatorial and low-latitude electrodynamic and ionospheric disturbances during the 22–23 June 2015 geomagnetic storm using ground-based and spaceborne techniques, *J. Geophysical Research Space Physics*, 2018, Vol. 123, pp. 2424–2440, DOI: 10.1002/2017JA024981.
- 9. Dow J. M., Neilan R. E., Rizos C., The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems, *J. Geodesy*, 2009, Vol. 83, pp. 191–198, DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3.
- 10. Dudok de Wit T., Watermann J., Solar forcing of the terrestrial atmosphere, *Comptes Rendus Geoscience*, 2009, Vol. 342, No. 4–5, pp. 259–272, DOI: 10.1016/j.crte.2009.06.001.
- 11. Hernandez-Pajares M., Juan M.J., Sanz J., Aragon-Angel A., Garcia-Rigo A., Salazar D., Escudero M., The ionosphere: effects, GPS modeling and the benefits for space geodetic techniques, *J. Geodesy*, 2011, Vol. 85, pp. 887–907, DOI: 10.1007/s00190-011-0508-5.
- 12. Jakowski N., Mayer C., Hoque M. M., Wilken V., Total electron content models and their use in ionosphere monitoring, *Radio Science*, 2011, Vol. 46, RS0D18, DOI: 10.1029/2010RS004620.
- 13. Jin S., Feng G. P., Gleason S., Remote sensing using GNSS signals: Current status and future directions, *Advances in Space Research*, 2011, Vol. 47, pp. 1645–1653, DOI: 10.1016/j.asr.2011.01.036.
- 14. Kamide Y., Balan N., The importance of ground magnetic data in specifying the state of magnetosphere-ionosphere coupling: a personal view, *Geoscience Letters*, 2016, Vol. 3, No. 10, DOI: 10.1186/ s40562-016-0042-7.
- 15. Klimenko M. V., Klimenko V. V., Despirak I. V., Zakharenkova I. E., Kozelov B. V., Cherniakov S. M., Andreeva E. S., Tereshchenko E. D., Vesnin A. M., Korenkova N. A., Gomonov A. D., Vasiliev E. B., Ratovsky K. G., Disturbances of the thermosphere-ionosphere-plasmasphere system and auroral electrojet at 30°E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, Vol. 180, pp. 78–92, DOI: 10.1016/j.jastp.2017.12.017.

- 16. Kunitsyn V.E., Padokhin A.M., Kurbatov G.A., Yasyukevich Yu.V., Morozov Yu.V., Ionospheric TEC estimation with the signals of various geostationary navigational satellites, *GPS Solution*, 2016, Vol. 20, pp. 877–884, DOI: 10.1007/s10291-015-0500-2.
- Liu Y., Fu L., Wang J., Zhang C., Studying Ionosphere Responses to a Geomagnetic Storm in June 2015 with Multi-Constellation Observations, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, pp. 666–686, DOI: 10.3390/ rs10050666.
- 18. Loewe C.A., Prölss G.W., Classification and mean behavior of magnetic storms, *J. Geophysical Research*, 1997, Vol. 102, No. A7, pp. 14209–14213.
- Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., Ho C.H., Lindqwister U.J., Runge T.F., A global mapping technique for GPS-derived ionospheric TEC measurements, *Radio Science*, 1998, Vol. 33, No. 3, pp. 565– 582, DOI: 10.1029/97RS02707.
- 20. Prölss G.W., Ionospheric F-region storms, In: *Handbook of atmospheric electrodynamics*, *Vol. 2*, *Ch. 8*, Volland H. (ed.), Boca Raton, U.S.: CRC Press, 1995, pp. 195–248.
- 21. Ratovsky K. G., Klimenko M. V., Klimenko V. V., Chirik N. V., Korenkova N. A., Kotova D. S., Aftereffects of geomagnetic storms: statistical analysis and theoretical explanation, *Solar-Terrestrial Physics*, 2018, Vol. 4, No. 4, pp. 26–32, DOI: 10.12737/stp-44201804.
- 22. Reinisch B. W., Modern Ionosondes, In: *Modern Ionospheric Science*, Kohl H., Rüster R., Schlegel K. (eds.), European Geophysical Society, Germany, 1996, pp. 440–458.
- Shpynev B. G., Khabituev D. S., Estimation of the plasmasphere electron density and O<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> transition height Irkutsk incoherent scatter data and GPS total electron content, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2014, Vol. 119, pp. 223–228, DOI: 10.1016/j.jastp.2014.01.007.
- Shpynev B. G., Kurkin V. I., Ratovsky K. G., Chernigovskaya M. A., Belinskaya A. Yu., Grigorieva S. A., Stepanov A. E., Bychkov V. V., Pancheva D., Mukhtarov P., High-midlatitude ionosphere response to major stratospheric warming, *Earth, Planets and Space*, 2015, Vol. 67, 10 p., DOI: 10.1186/s40623-015-0187-1.
- Shpynev B. G., Zolotukhina N. A., Polekh N. M., Ratovsky K. G., Chernigovskaya M. A., Belinskaya A. Yu., Stepanov A. E., Bychkov V. V., Grigorieva S. A., Panchenko V. A., Korenkova N. A., Mielich J., The ionosphere response to severe geomagnetic storm in March 2015 on the base of the data from Eurasian highmiddle latitudes ionosonde chain, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, Vol. 180, pp. 93–105, DOI: 10.1016/j.jastp.2017.10.014.
- 26. Wu X., Hu X., Gong X., Zhang X., Wang X., Analysis of inversion errors of ionospheric radio occultation, *GPS Solution*, 2009, Vol. 13, No. 3, pp. 231–239, DOI: 10.1007/s10291-008-0116-x.
- 27. Yasyukevich Yu. V., Mylnikova A. A., Polyakova A. S., Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data, *Results Physics*, 2015, Vol. 5, pp. 32–33, DOI: 10.1016/j.rinp.2014.12.006.
- Zakharenkova I., Astafyeva E., Cherniak I., GPS and GLONASS observations of large-scale traveling ionospheric disturbances during the 2015 St. Patrick's Day storm, J. Geophysical Research Space Physics, 2016, Vol. 121, pp. 12138–12156, DOI: 10.1002/2016JA023332.
- Zakharenkova I. E., Cherniak Iu. V., Shagimuratov I. I., Klimenko M. V., Features of High-Latitude Ionospheric Irregularities Development as Revealed by Ground-Based GPS Observations, Satellite-Borne GPS Observations and Satellite In Situ Measurements over the Territory of Russia during the Geomagnetic Storm on March 17–18, 2015, *Geomagnetism Aeronomy*, 2018, Vol. 58, No. 1, pp. 70–82, DOI: 10.1134/ S0016793217050176.
- Zolotukhina N., Polekh N., Kurkin V., Rogov D., Romanova E., Chelpanov M., Ionospheric effects of St. Patrick's storm over Asian Russia: 17–19 March 2015, *J. Geophysical Research Space Physics*, 2017, Vol. 122, pp. 2484–2504, DOI: 10.1002/2016JA023180.