

Исследование причин долготных неоднородностей ионосферных возмущений в северном полушарии во время геомагнитных бурь

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

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

Выполнено исследование характера долготных вариаций компонент геомагнитного поля на основе данных двух цепей магнитометров в северном полушарии вблизи $\sim 55^\circ$ и $\sim 70^\circ$ с. ш. в течение временных периодов, связанных с развитием четырёх магнитных бурь в 2012–2014 гг. Установлено, что долготная изменчивость компонент геомагнитного поля имеет нерегулярную структуру, обусловленную несовпадением северного географического и геомагнитного полюсов, а также наличием аномалий различных пространственных масштабов в фоновом магнитном поле Земли. Особенности долготно-временных вариаций магнитного поля Земли также зависят от индивидуальных особенностей развития магнитных бурь. По данным среднеширотной цепи магнитометров зона сильных вариаций Н- и Z-компонент геомагнитного поля формируется в направлении меридиана геомагнитного полюса $\sim 270^\circ$ (в географических координатах) как в условиях низкой, так и возмущённой геомагнитной активности. В магнитовозмущённые периоды образуются две зоны сильных вариаций магнитного поля Земли симметрично относительно меридиана геомагнитного полюса на долготах $\sim 40^\circ$ и $\sim 130^\circ$. Между этими двумя зонами всегда образуется сектор с наименьшими вариациями геомагнитного поля на долготах $80\text{--}110^\circ$. Вдоль высокоширотной цепи магнитометров максимальные значения вариаций Z-компоненты геомагнитного поля наблюдаются на долготах $\sim 130^\circ$, $\sim 300^\circ$ и $\sim 200^\circ$. Для вариаций Н-компоненты максимум значений расположен в секторе долгот $\sim 130\text{--}200^\circ$. Эта особенность структуры и вариаций геомагнитного поля приводит к тому, что развитие геомагнитных бурь в ионосфере также обладает выраженной долготной неоднородностью.

Ключевые слова: вариации геомагнитного поля, геомагнитная буря, ионосферные возмущения

Одобрена к печати: 23.08.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-241-250

Введение

Изучение воздействия вариаций магнитного поля Земли различных пространственно-временных масштабов на околоземное пространство является важной частью исследования так называемой космической погоды. Большое внимание уделяется событиям резких кратковременных возмущений геомагнитного поля (ГМП), или магнитных бурь. Магнитные бури носят планетарный характер и оказывают глобальное воздействие на околоземное пространство. Все геосферы, и особенно верхние её слои — термосфера, ионосфера, магнитосфера, подвергаются сильным изменениям, причём более всего — в высокоширотных областях. Усиливаются электрические токи в ионосфере и магнитосфере. Высыпания потоков энергичных частиц из магнитосферы в ионосферу в приполярных областях вызывают полярные сияния. Границы главного ионосферного провала и зоны высыпания частиц смещаются к экватору в средние широты, возрастают градиенты электронной концентрации на их границах, формируются спорадические ионосферные слои (Мизун, 1980; Gubenko et al., 2018; MacDougall et al., 2000; Zolotukhina et al., 2017). Эффекты магнитных бурь в ионосфере подробно рассмотрены в обзорах (Buonsanto, 1999; Danilov, Laštovička, 2001), где обсуждается роль различных факторов: распространение эффектов бурь по широте и долготе, проникновение электрических полей из высоких широт в низкие, усиление направленного к экватору термосферного ветра, а также «сумеречное» повышение электронной плотности в средних широтах.

В работах (Шпынев и др., 2017; Shpynev et al., 2017) на основе данных Евразийской сети ионозондов и данных мировой сети магнитометров был проведён комплексный анализ

ионосферных возмущений во время большой магнитной бури в марте 2015 г. Над Евразией образовались три выделенных долготных сектора с разным характером реакции ионосферы на сильное геомагнитное возмущение. Установлено, что эти различия в ионосферной реакции были связаны с долготной асимметрией в вариациях компонент ГМП, выявленной по данным высоко- и среднеширотной цепей магнитометров. Долготное распределение вариаций *H*- и *Z*-компонент ГМП в северном полушарии имело трёхлепестковую структуру. На средних широтах Евразийского континента чётко выявлены две зоны повышенного уровня геомагнитных вариаций (центрированные вблизи долгот $\sim 30\text{--}40^\circ$ и $\sim 130\text{--}140^\circ$ в.д.) и зона минимальных вариаций (вблизи долгот $\sim 80\text{--}90^\circ$ в.д.).

В настоящее время пространственно-временная структура магнитного поля Земли изучена достаточно хорошо. Модуль магнитного поля Земли, измеренный на поверхности, изменяется примерно от 25 000 нТл вблизи экватора до 65 000 нТл вблизи полюсов (Зверева, 2015). Из-за неоднородности порождающих магнитное поле внутренних источников величина магнитного поля у поверхности Земли имеет сложное пространственное распределение и непрерывно изменяется. Поэтому десятки наземных магнитометрических станций, передвижные средства (суда, самолёты, спутники), оснащённые специальными измерительными приборами, ведут непрерывное наблюдение за магнитным полем Земли. Отдельные магнитные обсерватории проводят измерения ГМП в точках своего расположения уже в течение ста и более лет. Источником информации о величине поля в далёком прошлом могут быть палеомагнитные исследования, основанные на изменениях намагниченности породы в кернах. Наблюдения векового хода ГМП с наземных магнитных обсерваторий, которые имеют длинные ряды данных, показывают, что величины компонент вектора ГМП медленно меняются год от года. Важную информацию о глобальных пространственно-временных вариациях ГМП дают спутниковые измерения. В настоящее время функционирует проект SWARM (http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Swarm) Европейского космического агентства (ESA), стартовавший в 2013 г. и предназначенный для картографирования собственного магнитного поля Земли. От прежних одиночных космических аппаратов MAGSAT, CHAMP и OERSTED группировку SWARM отличает рекордная точность измерений и использование трёх спутников одновременно. Измерения со спутников показали, что в магнитном поле Земли происходят значительные изменения (Hemant, Maus, 2005; Kim et al., 2004; Olsen et al., 2015; Thébault et al., 2016). Напряжённость ГМП падает, причём неравномерно. По спутниковым данным, напряжённость ГМП уменьшилась в среднем на 1,5 % за период около 15 лет. Скорость снижения величины магнитного поля Земли увеличивается. Наибольший уровень снижения наблюдается в западном полушарии, например, в южной части Атлантического океана — на 10 %. Спутниковые данные о постепенном ослаблении ГМП подтверждаются измерениями геомагнитных обсерваторий. В ряде мест напряжённость поля, вопреки общей тенденции, несколько возросла. Причём часто происходит перераспределение напряжённости ГМП между вертикальной и горизонтальной компонентами. Так, например, за 130 лет наблюдений ГМП в Иркутске (<http://magnit.iszf.irk.ru/index.php?page=patron5>) вертикальная *Z*-компонента ГМП увеличилась на 3,8 %, а горизонтальная *H*-компонента уменьшилась на 6 %. Однако раньше, по данным палеомагнитных наблюдений, магнитное поле ослаблялось примерно на 5 % за столетие.

В магнитном поле Земли, имеющем в целом дипольную конфигурацию, ранее отмечались и в настоящее время продолжают наблюдаться пространственные и временные аномалии (отклонения значений напряжённости ГМП от его средних показателей на поверхности Земли для конфигурации эквивалентного диполя $\sim 20\%$) (Зверева, 2015). Долговременные аномалии ГМП с периодами от 10 до 10 000 лет характеризуются охватом больших пространственных территорий. Источники этих аномалий связаны не с внешними воздействиями, а с процессами в основном (внутреннем) источнике магнитного поля Земли (жидком земном ядре, мантии, земной коре), который генерирует до 95 % ГМП (Зверева, 2015; Achache et al., 1988; Hinz, 1979). Магнитные аномалии на Земле делятся на локальные, региональные и континентальные (мировые). Локальные (местные) магнитные аномалии (площадь составляет сотни квадратных метров — сотни квадратных километров), обусловлены залеганием

полезных ископаемых, особенно железных руд, в верхних частях коры или особенностями намагниченности поверхностных пород (например, Курская магнитная аномалия, расположенная территориально в пределах Курской, Белгородской и Орловской областей России). Региональные магнитные аномалии (площадь — от 1000 до 10 000 км²) связаны с особенностями строения земной коры, в первую очередь со строением и движением кристаллического фундамента — тектонических плит. Континентальные (крупномасштабные) магнитные аномалии (площадь — от 10 000 до 100 000 км²) вызваны особенностями движения потоков вещества в раскалённом железном ядре Земли, создающем её основное магнитное поле. В северном полушарии — две континентальные аномалии: Восточносибирская (положительная магнитная аномалия в нижнем междуречье Енисея и Лены) и Канадская (положительная магнитная аномалия в районе северных островов). В южном полушарии — Бразильская или Южно-Атлантическая (отрицательная магнитная аномалия у берегов Бразилии) и Приантарктическая (положительная магнитная аномалия на меридиане Австралии). Эти магнитные аномалии меняются со временем: двигаются, усиливаются, ослабевают, распадаются и возникают вновь. Все вышеперечисленные факты указывают на сложную пространственно-временную структуру магнитного поля Земли и его вариаций (Зверева, 2015; Achache et al., 1988; Nemant, Maus, 2005; Hinze, 1979; Kim et al., 2004; Olsen et al., 2015; Thébault et al., 2016).

Помимо долговременных наблюдаются кратковременные резкие возмущения ГМП длительностью от нескольких часов до нескольких суток, вызванные активными событиями на Солнце с последующим вторжением в околоземное пространство высокоскоростных потоков солнечного ветра и связанной с ними ударной волны, которые называются магнитосферными бурями (Гульельми, 2016; Akasofu, 2011; Gonzalez et al., 1994). В рамках комплексного подхода к изучению процессов в системе Солнце – Земля, который в настоящее время является одним из приоритетных и актуальных направлений в изучении околоземного космического пространства и солнечно-земных связей, особую актуальность приобретают исследования не только самих фоновых или медленно меняющихся величин магнитного поля Земли, но и резких вариаций ГМП во время гелио- и геомагнитных возмущений. Сильные и внезапные вариации магнитного поля Земли во время геомагнитных бурь вызывают целый комплекс эффектов в полярной и среднеширотной ионосфере (ионосферные бури) (Мизун, 1980; Buonsanto, 1999; Danilov, Laštovička, 2001; Gubenko et al., 2018; MacDougall et al., 2000; Zolotukhina et al., 2017), существенно изменяя её параметры и, как следствие, условия распространения радиоволн. Интенсивность ионосферной бури определяется поступлением энергии Солнца и солнечного ветра в магнитосферу, ионосферу и термосферу Земли и перераспределением энергии между этими геосферами. Понимание процессов магнитосферно-ионосферных взаимодействий даёт возможность осуществлять прогнозирование поведения ионосферы, состояние которой во многом определяет стабильность работы систем радиосвязи, навигации и энергосистем, что необходимо для обеспечения безопасности космических полётов, защиты космонавтов и надёжности работы аппаратуры как в космосе, так и на Земле.

Как говорилось выше, по результатам анализа магнитосферной и ионосферной возмущённости во время большой геомагнитной бури в марте 2015 г. была установлена специфическая долготная структура проникновения геомагнитных вариаций на средние широты Евразии (Шпынев и др., 2017; Shpynev et al., 2017), которая является устойчивой, но не может быть явно описана в рамках дипольной модели ГМП. Поэтому целью данной работы является проверка на основе геомагнитных данных повторяемости и устойчивости наблюдаемой долготной неоднородности вариаций компонент ГМП в северном полушарии в разные сезоны года при спокойных и возмущённых геомагнитных условиях.

Данные измерений геомагнитных параметров

Для восстановления пространственной структуры и временных вариаций ГМП использовались данные глобальной сети магнитометров INTERMAGNET (<http://www.intermagnet.org>), а также данные высокоширотных обсерваторий (https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/). Пункты геомагнитных наблюдений были разбиты на две цепи (рис. 1, см. с. 244):

высокоширотную — вдоль $\sim 70^\circ$ с. ш. (12 магнитометров, обозначены кружками красного цвета) и среднеширотную — вдоль $\sim 55^\circ$ с. ш. (14 магнитометров, обозначены кружками голубого цвета). Координаты и международные IAGA-коды станций указаны в *табл. 1*.

Таблица 1. Магнитометры северного полушария

№	Станция	IAGA-коды	Географические координаты	
			Широта	Долгота
Высокие широты $\sim 70^\circ$ с. ш.				
1	Абиско	ABK	68,4	18,8
2	Соданкюля	SOD	67,4	26,6
3	Амдерма	AMD	69,5	61,4
4	Диксон	DIK	73,5	80,6
5	Норильск	NOK	69,4	88,1
6	Бухта Тикси	TIK	71,6	129,0
7	Певек	PBK	70,1	170,9
8	Барроу	BRW	71,3	203,4
9	Дедхорс	DED	70,4	211,2
10	Кембридж-Бэй	CBB	69,1	255,0
11	Резолют-Бэй	RES	74,7	265,1
12	Кекертарсуак	GDH	69,3	306,5
Средние широты $\sim 55^\circ$ с. ш.				
1	Хейл	HLP	54,6	18,8
2	Борок	BOX	58,1	38,2
3	Арти	ARS	59,4	58,6
4	Новосибирск	NVS	54,8	83,2
5	Иркутск	IRT	52,2	104,5
6	Якутск	YAK	62,0	129,7
7	Паратунка	PET	53,0	158,2
8	Остров Шумагина	SHU	55,4	199,6
9	Ситка	SIT	57,1	224,7
10	Форт Черчилль	FCC	58,8	265,9
11	Сент-Джонс	STJ	47,6	307,3
12	Нарсарсуак	NAQ	61,2	314,6
13	Валентия	VAL	51,9	349,8
14	Эскдалемур	ESK	55,3	356,8

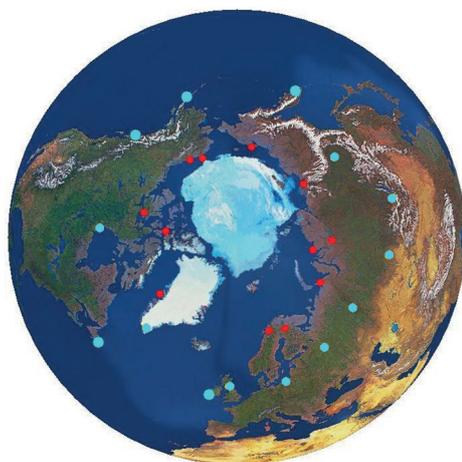


Рис. 1. Схема расположения геомагнитных обсерваторий

Результаты анализа и обсуждение

Для анализа вариаций ГМП были изучены четыре магнитовозмущённых периода в разные сезоны года, связанные с геомагнитными бурями текущего 24-го цикла солнечной активности, для которых индекс D_{st} достигал значений -100 нТл и ниже (табл. 2).

Таблица 2. Периоды анализируемых геомагнитных бурь

Продолжительность геомагнитных бурь	D_{st} , нТл
12.11.2012 23:12 – 14.11.2012 19:00	-108
17.03.2013 06:00 – 18.03.2013 12:00	-132
31.05.2013 16:17 – 02.06.2013 21:00	-119
18.02.2014 13:54 – 19.02.2014 23:00	-112

В качестве основной характеристики изменчивости ГМП для каждого пункта наблюдения мы использовали ежечасные дисперсии значений Н- и Z-компонент ГМП от соответствующих фоновых значений. Фоновые значения компонент ГМП определялись по данным, полученным в течение магнитоспокойных дней, предшествующих дате начала геомагнитной бури (см. табл. 2).

Временные ряды значений дисперсий, рассчитанные для каждой станции высоко- и среднеширотной цепей магнитометров для временного интервала один месяц до и после периода магнитной бури, использовались для построения долготно-временных карт вариаций Н- и Z-компонент ГМП в спокойных и возмущённых геомагнитных условиях.

Для примера на рис. 2 (см. с. 246) представлены долготно-временные карты вариаций Н- и Z-компонент ГМП в средних широтах в течение периода, связанного с магнитной бурей 17–18 марта 2013 г. (см. табл. 2). На рисунках справа представлены в полярных координатах усреднённые долготные структуры вариативности Н- и Z-компонент ГМП для разных моментов времени в течение главной фазы магнитной бури 17 марта 2013 г.

В целом аналогичные долготные распределения вариаций компонент ГМП в средних широтах были получены для временных периодов, связанных с тремя другими магнитными бурями из табл. 2. Таким образом, при анализе четырёх геомагнитных возмущений (12.11.2012, 17.03.2013, 31.05.2013, 18.02.2014) установлено, что усиление вариаций ГМП во время геомагнитных возмущений является неоднородным по долготе. Как и в проведённом ранее исследовании для бури в марте 2015 г. (Шпынев и др., 2017; Shpynev et al., 2017), в долготном распределении интенсивности геомагнитных вариаций явно выделяются зоны усиленного проникновения возмущений на средние широты, даже несмотря на разное локальное время прихода возмущений. Максимум сильных вариаций ГМП формируется в секторе $\sim 270^\circ$ в направлении меридиана геомагнитного полюса, и этот максимум проявляется как в спокойные, так и в магнитовозмущённые дни. В магнитовозмущённые периоды образуются два сектора сильных вариаций ГМП примерно симметрично напротив относительно меридиана геомагнитного полюса на долготах $\sim 40^\circ$ и $\sim 130^\circ$. Между этими двумя зонами всегда образуется сектор с наименьшими вариациями геомагнитного поля на долготах $80\text{--}110^\circ$.

Появление зоны сильной изменчивости ГМП во время магнитных бурь на долготе $\sim 130^\circ$ происходит обычно позже по сравнению с основным максимумом на долготе $\sim 270^\circ$. Но максимальные значения величин вариаций компонент ГМП в зоне на долготе $\sim 130^\circ$ могут превышать величины вариаций компонент ГМП в зоне основного максимума на долготе $\sim 270^\circ$.

Вдоль высокоширотной цепи магнитометров максимальные значения вариаций Z-компоненты ГМП наблюдаются на долготах $\sim 130^\circ$, $\sim 300^\circ$ и $\sim 200^\circ$ (рис. 3, нижняя панель). Для вариаций Н-компоненты ГМП максимум значений вариаций расположен в секторе долготы $\sim 130\text{--}200^\circ$ (рис. 3, верхняя панель, см. с. 246).

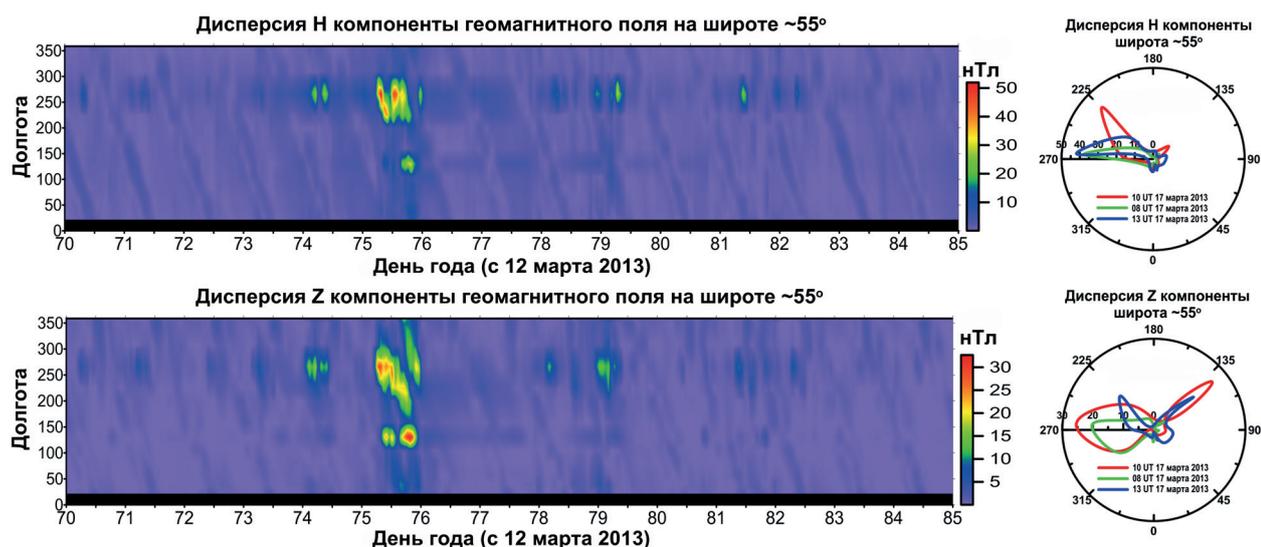


Рис. 2. Долготно-временные карты вариаций Н- и Z-компонент ГМП в средних широтах в течение периода, связанного с магнитной бурей 17–18 марта 2013 г. (слева) и усреднённые долготные структуры вариативности Н- и Z-компонент ГМП в полярных координатах для разных моментов времени UT в течение главной фазы магнитной бури 17–18 марта 2013 г. (справа)

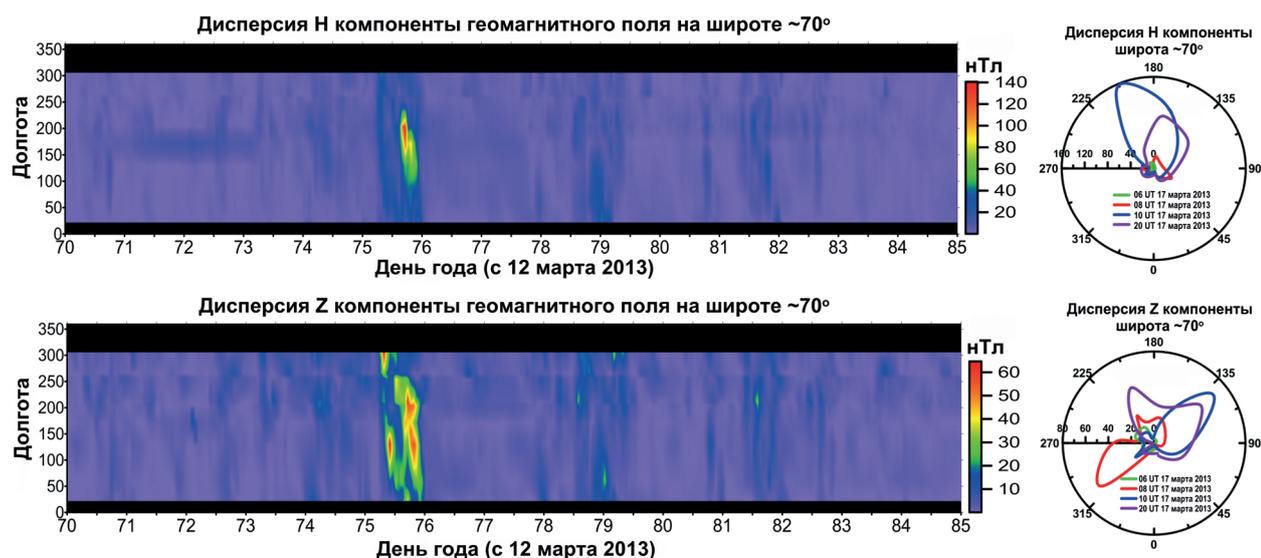


Рис. 3. Долготно-временные карты вариаций Н- и Z-компонент ГМП в высоких широтах в течение периода, связанного с магнитной бурей 17–18 марта 2013 г. (слева) и усреднённые долготные структуры вариативности Н- и Z-компонент ГМП в полярных координатах для разных моментов времени UT в течение главной фазы магнитной бури 17–18 марта 2013 г. (справа)

Общеизвестно, что во время магнитосферных бурь динамика ГМП в высоких широтах определяется изменением структуры аврорального электроджета с появлением нескольких токовых систем, движущихся солнечно-синхронно (Лайонс, Уильямс, 1987). Но, несмотря на этот основной механизм, наблюдаемые вариации ГМП имеют ярко выраженные геосинхронные долготные неоднородности, т.е. связанные с внутренней структурой ГМП. Следовательно, при анализе проявлений геомагнитной активности эти механизмы должны рассматриваться совместно.

Абсолютные значения величины дисперсии Н- и Z-компонент ГМП по данным высокоширотных магнитометров примерно в два раза превышают величины дисперсий вариаций в средних широтах (см. рис. 2 и 3).

Важно отметить, что аналогичный характер долготной зависимости величин вариаций ГМП наблюдается для всех рассматриваемых геомагнитных бурь, практически не зависит от времени UT в период главной фазы бурь, а также слабо зависит от сезона года. Это свойство ГМП является весьма неожиданным, поскольку ионосферные эффекты, связанные с геомагнитными возмущениями, обычно сильно зависят от времени начала главной фазы бури.

Выводы

Выполненное в работе исследование долготной зависимости вариаций компонент ГМП в северном полушарии в спокойных и возмущённых геомагнитных условиях в течение временных периодов, связанных с развитием четырёх магнитных бурь в 2012–2014 гг., позволило сделать следующие выводы.

Структура геомагнитного поля Земли в северном полушарии существенно отличается от модели магнитного диполя, что обусловлено несовпадением северного географического и геомагнитного полюсов, а также, возможно, наличием аномалий различных пространственных масштабов в фоновом магнитном поле Земли. Эта долготная неоднородность наиболее ярко проявляется во время мощных геомагнитных возмущений, когда на средних широтах Северного полушария формируются три ярко выраженных долготных сектора повышенных вариаций ГМП, не обладающие полной симметрией.

Абсолютные значения величин дисперсий компонент ГМП по данным высокоширотных магнитометров примерно в два раза превышают величины дисперсий вариаций в средних широтах.

Особенности долготно-временных вариаций в системе магнитосфера – ионосфера обычно зависят от индивидуальных характеристик развития каждой магнитной бури. Однако для всех рассмотренных геомагнитных бурь характер долготной зависимости величин вариаций ГМП аналогичен, практически не зависит от времени UT в период главной фазы бурь, а также слабо зависит от сезона года.

Статистическая обработка данных наблюдений и их анализ выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-00681). Частично экспериментальные данные получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» (<http://скр-rf.ru/скр/3056/>). Методы математической и программной обработки данных получены в рамках базового финансирования программы ФНИ П.12.

Литература

1. *Гульельми А. В.* О феноменологической теории магнитных бурь // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2. № 2. С. 29–34. DOI: 10.12737/18126.
2. *Зверева Т. И.* Динамика главного магнитного поля Земли с 1900 года по наши дни // Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли: Юбилейный сборник ИЗМИРАН-75 / под ред. В. Д. Кузнецова. М.: ИЗМИРАН, 2015. С. 36–45.
3. *Лайонс Л., Уильямс Д.* Физика магнитосферы. Количественный подход. М.: Мир, 1987. 312 с.
4. *Мизун Ю. Г.* Полярная ионосфера. Л.: Наука, 1980. 216 с.
5. *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.
6. *Achache J., Cohen Y., Counil J.-L.* The magnetic anomalies of the Earth's crust // Endeavour. 1988. V. 12. No. 4. P. 154–162. DOI: 10.1016/0160-9327(88)90160-3.
7. *Akasofu S. I.* A historical review of the geomagnetic storm-producing plasma flows from the Sun // Space Science Reviews. 2011. V. 164. P. 85. DOI: 10.1007/s11214-011-9856-y.
8. *Buonsanto M. J.* Ionospheric storms — a review // Science Reviews. 1999. V. 88. P. 563–601.

9. Danilov A. D., Laštovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // Intern. J. Geomagnetism and Aeronomy. 2001. V. 2. No. 3. P. 209–224.
10. Gonzalez W. D., Joselyn J. A., Kamide Y., Kroehl H. W., Rostoker G., Tsurutani B. T., Vasyliunas V. M. What is a geomagnetic storm? // J. Geophysical Research. 1994. V. 99. No. A4. P. 5771–5792.
11. Gubenko V. N., Pavelyev A. G., Kirillovich I. A., Liou Y.-A. Case study of inclined sporadic E layers in the Earth's ionosphere observed by CHAMP/GPS radio occultations: Coupling between the tilted plasma layers and internal waves // Advances in Space Research. 2018. V. 61. No. 7. P. 1702–1716. DOI: 10.1016/j.asr.2017.10.001.
12. Hemant K., Maus S. Geological modeling of the new CHAMP magnetic anomaly maps using a geographical information system technique // J. Geophysical Research. 2005. V. 110. B12103. DOI: 10.1029/2005JB003837.
13. Hinze W. J. Continental magnetic anomalies // Reviews of geophysics and space physics. 1979. V. 17. No. 2. P. 257–273.
14. Kim H. R., von Frese R. R. B., Golynsky A. V., Taylor P. T., Kim J. W. Application of satellite magnetic observations for estimating near-surface magnetic anomalies // Earth Planets and Space. 2004. V. 56. P. 955. DOI: 10.1186/BF03351793.
15. MacDougall J. W., Jayachandran P. T., Plane J. M. C. Polar cap Sporadic-E: part 1, observations // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2000. V. 62. P. 1155–1167.
16. Olsen N., Hulot G., Lesur V., Finlay C. C., Beggan C., Chulliat A., Sabaka T. J., Foberghagen R., Friis-Christensen E., Haagmans R., Kotsiaros S., Lühr H., Toffner-Clausen L., Vigneron P. The Swarm Initial Field Model for the 2014 geomagnetic field // Geophysical Research Letters. 2015. V. 42. P. 1092–1098. DOI: 10.1002/2014GL062659.
17. 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. In press. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.10.014.
18. Thébaud E., Vigneron P., Langlais B., Hulot G. A Swarm lithospheric magnetic field model to SH degree 80 // Earth, Planets and Space. 2016. V. 68. P. 126. DOI: 10.1186/s40623-016-0510-5.
19. 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.

Studying the causes of longitudinal irregularities of ionospheric disturbances in the Northern Hemisphere during magnetic storms

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

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

The longitudinal structure of geomagnetic field variations is studied on the basis of two magnetometer chains in the Northern Hemisphere located near latitudes $\sim 55^\circ\text{N}$ and $\sim 70^\circ\text{N}$ during the time periods associated with the development of four magnetic storms in 2012–2014. It has been found that the geomagnetic field variability has irregular longitudinal structure due to difference of geographic and geomagnetic poles and also, perhaps, the existence of anomalies of different spatial scales in the background magnetic field of the Earth. The features of longitudinal variations of the geomagnetic field also depend on the individual characteristics of magnetic storm development. According to the mid-latitude magnetometer chain, the zone of strong variations of H- and Z-components of geomagnetic field is formed in the direction of the Northern geomagnetic pole meridian near $\sim 270^\circ$ (in geographical coordinates) both in conditions of low and disturbed geomagnetic activity. In the magneto-disturbed periods over Eurasia, two zones of strong variations of the Earth's magnetic field are formed symmetrically with respect to the geomagnetic pole meridian at $\sim 40^\circ$ and $\sim 130^\circ$ longitudes. Between these

two zones, there always a sector is formed with the lowest geomagnetic field variations at the longitudes of 80–110°. Along the high-latitude magnetometer chain, the maximum values of Z-component geomagnetic field variations are observed at ~130°, ~300° and ~200° longitudes. For variations of H-component the maximum values are located in the sector of longitudes ~130–200°. These features of the longitudinal structure and variations of the geomagnetic field lead to the fact that the development of geomagnetic storms in the ionosphere also has pronounced longitudinal inhomogeneities.

Keywords: geomagnetic field variations, geomagnetic storm, ionospheric disturbances.

Accepted: 23.08.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-241-250

References

1. Guglielmi A. V., On the phenomenological theory of magnetic storms. *Solar-Terrestrial Physics*, 2016, Vol. 2, No. 2, pp. 37–45, DOI: 10.12737/20998.
2. Zvereva T. I., Dinamika glavnogo magnitnogo polya Zemli s 1900 goda po nashi dni (Dynamics of the main magnetic field of the Earth from 1900 to our days), *Elektromagnitnye i plazmennye protsessy ot nedr Solntsa do nedr Zemli, Yubileinyi sbornik IZMIRAN-75* (Electromagnetic and plasma processes from the Sun to the Earth), Moscow: IZMIRAN, 2015, pp. 36–45.
3. Lyons L. R., Williams D. J., *Quantitative Aspects of Magnetospheric Physics*, D. Reidel Publishing Company, 1984, 246 p.
4. Mizun Yu. G. *Polyarnaya ionosfera (Polar ionosphere)*, Leningrad: Nauka, 1980, 216 p.
5. Shpynev B. G., Zolotukhina N. A., Polekh N. M., Chernigovskaya M. A., Ratovskii K. G., Belinskaya A. Yu., Stepanov A. E., Bychkov V. V., Grigor'eva S. A., Panchenko V. A., Koren'kova N. A., Melich I., Issledovanie ionosfernogo otklika na sil'nyuyu geomagnitnyuyu 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.
6. Achache J., Cohen Y., Counil J.-L., The magnetic anomalies of the Earth's crust, *Endeavour*, 1988, Vol. 12, No. 4, pp. 154–162, DOI: 10.1016/0160-9327(88)90160-3.
7. Akasofu S. I., A historical review of the geomagnetic storm-producing plasma flows from the Sun, *Space Science Reviews*, 2011, Vol. 164, pp. 85, DOI: 10.1007/s11214-011-9856-y.
8. Buonsanto M. J., Ionospheric storms — a review, *Space Science Reviews*, 1999, Vol. 88, pp. 563–601.
9. Danilov A. D., Laštovička J., Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere, *Intern. J. Geomagnetism and Aeronomy*, 2001, Vol. 2, No. 3, pp. 209–224.
10. Gonzalez W. D., Joselyn J. A., Kamide Y., Kroehl H. W., Rostoker G., Tsurutani B. T., Vasyliunas V. M., What is a geomagnetic storm? *J. Geophysical Research*, 1994, Vol. 99, No. A4, pp. 5771–5792.
11. Gubenko V. N., Pavelyev A. G., Kirillovich I. A., Liou Y.-A., Case study of inclined sporadic E layers in the Earth's ionosphere observed by CHAMP/GPS radio occultations: Coupling between the tilted plasma layers and internal waves, *Advances in Space Research*, 2018, Vol. 61, No. 7, pp. 1702–1716, DOI: 10.1016/j.asr.2017.10.001.
12. Hemant K., Maus S., Geological modeling of the new CHAMP magnetic anomaly maps using a geographical information system technique, *J. Geophysical Research*, 2005, Vol. 110, B12103, DOI: 10.1029/2005JB003837.
13. Hinze W. J., Continental magnetic anomalies, *Reviews of geophysics and space physics*, 1979, Vol. 17, No. 2, pp. 257–273.
14. Kim H. R., von Frese R. R. B., Golynsky A. V., Taylor P. T., Kim J. W., Application of satellite magnetic observations for estimating near-surface magnetic anomalies, *Earth Planets and Space*, 2004, Vol. 56, pp. 955, DOI: 10.1186/BF03351793.
15. MacDougall J. W., Jayachandran P. T., Plane J. M. C., Polar cap Sporadic-E: part 1, observations, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2000, Vol. 62, pp. 1155–1167.
16. Olsen N., Hulot G., Lesur V., Finlay C. C., Beggan C., Chulliat A., Sabaka T. J., Floberghagen R., Friis-Christensen E., Haagmans R., Kotsiaros S., Lühr H., Tøffner-Clausen L., Vigneron P., The Swarm Initial Field Model for the 2014 geomagnetic field, *Geophysical Research Letters*, 2015, Vol. 42, pp. 1092–1098, DOI: 10.1002/2014GL062659.

17. 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*, In press, DOI: 10.1016/j.jastp.2017.10.014.
18. Thébault E., Vigneron P., Langlais B., Hulot G., A Swarm lithospheric magnetic field model to SH degree 80, *Earth, Planets and Space*, 2016, Vol. 68, pp. 126, DOI: 10.1186/s40623-016-0510-5.
19. 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.