

УДК 550.382:385

СОЛНЕЧНО-СУТОЧНЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ: СЕЗОННЫЕ И ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ SqY, SqZ НА ОБСЕРВАТОРИИ АІА

О. И. Максименко, О. Я. Шендеровская

Институт геофизики им. С.И.Субботина, Национальная Академия наук Украины, пр. Палладина 32, г. Киев, 03142; oksanashender@ukr.net

Реферат. Пространственная неоднозначность величины столетних трендов суточных амплитуд Sq вариаций определила исследование этого вопроса в районе отрицательных ВВ геомагнитного поля. **Цель.** Изучение характеристик (трендов суточных амплитуд и формы) солнечно-суточных Sq вариаций на антарктической обсерватории АІА. **Методы.** Анализ данных мониторинга геомагнитного поля на обсерватории за период 1958-1991гг. Исключение влияния зависимости суточной амплитуды Sq вариаций от индекса солнечной активности F10,7 с применением метода остатков регрессионного анализа. **Результаты.** Из анализа формы Sq вариаций были получены сезонные особенности SqZ, SqY: осенне-весенняя асимметрия и дополнительный утренний экстремум в суточном ходе Sq зимнего (апрель-сентябрь) типа. Обнаружены сезонные различия как среднемесячных значений суточной амплитуды Sq вариаций, так и величин их долговременного тренда за 33 года. **Выводы.** Выявленные положительные тренды среднегодовых суточных амплитуд Sq вариаций составили 11% для восточной SqY и 17-20% для вертикальной SqZ вариации. Наблюдаемый при этом разброс величины тренда годовых амплитуд Sq, по-видимому, обусловлен сезонными вариациями физических параметров, определяющих Sq.

Ключевые слова: форма Sq вариаций, осенне-весенняя асимметрия, тренд суточной амплитуды Sq.

СОЛЯНО-ДОБОВІ ГЕОМАГНІТНІ ВАРІАЦІЇ: СЕЗОННІ ТА ДОВГОТРИВАЛІ ЗМІНИ SqY, SqZ НА ОБСЕРВАТОРІЇ АІА

О. І. Максименко, О. Я. Шендеровська

Институт геофизики им. С. І.Субботина, Національна Академія наук України, м. Київ; oksanashender@ukr.net

Реферат. Просторова неоднозначність величини столітніх трендів добових амплітуд Sq варіацій визначила дослідження цього питання в районі від'ємних ВВ геомагнітного поля. **Мета.** Вивчення характеристик (трендів добових амплітуд і форми) сонячно-добових Sq варіацій на антарктичній обсерваторії АІА. **Методи.** Аналіз даних моніторингу геомагнітного поля на обсерваторії за період 1958-1991гг. Виняток впливу залежності добової амплітуди Sq варіацій від індексу сонячної активності F10,7 із застосуванням методу залишків регресійного аналізу. **Результати.** З аналізу форми Sq варіацій були отримані сезонні особливості SqZ, SqY: осінньо-весняна асиметрія і додатковий ранковий екстремум в добовому ході Sq зимового (квітень-вересень) типу. Виявлено сезонні відмінності як середньомісячних значень добової амплітуди Sq варіацій, так і величин їх довгострокового тренда за 33 роки. **Висновки.** Виявлені позитивні тренди середньорічних добових амплітуд Sq варіацій склали 11% для східної SqY і 17-20% для вертикальної SqZ варіації. Спостережуваний при цьому розкид величини тренду річних амплітуд Sq, мабуть, обумовлений сезонними варіаціями фізичних параметрів, що визначають Sq.

Ключові слова: форма Sq варіацій, осінньо-весняна асиметрія, тренд добової амплітуди Sq.

SOLAR-DIURNAL GEOMAGNETIC FIELD VARIATIONS: SEASONAL AND LONG-TERM CHANGES OF SqY, SqZ AT THE OBSERVATORY AIA

O.I. Maksimenko, O.Ya. Shenderovskaya

S.I. Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv; oksanashender@ukr.net

Abstract. The spatial ambiguity of the magnitude of centennial trends in the Sq variations diurnal amplitudes determined the investigation of this question in the region of negative century variations geomagnetic field. **Objective.** To study the characteristics (trends of diurnal amplitudes and shapes) of solar-diurnal Sq variations at the Antarctic observatory AIA. **Methods.** Analysis of geomagnetic field monitoring data at the observatory for the period 1958-1991. Exclusion of the effect of the dependence of

the daily amplitude of Sq variations on the solar activity index F10.7 using the regression analysis residual method. **Results.** From the analysis of the shape of Sq variations, seasonal features of SqZ , SqY were obtained: autumn-spring asymmetry and an additional morning extremum in the daily course of Sq winter (April-September) type. Seasonal differences were found both in the mean monthly values of the daily amplitude of Sq variations and in the values of their long-term trend for 33 years. **Conclusions.** The revealed positive trends of the average annual daily amplitudes of Sq variations were 11% for the eastern SqY and 17-20% for the vertical SqZ variation. The observed variation in the trend value of the annual amplitudes Sq is apparently due to seasonal variations of the physical parameters that determine Sq .

Key words: shape of Sq variations, autumn – spring asymmetry, trend of Sq daily amplitude.

1. Введение

Солнечно-суточные геомагнитные вариации могут быть хорошим инструментом изучения токовых систем в магнитосфере-ионосфере (Takeda, 2002, 2013, Stening et al., 2005, 2008, Torta et al, 2010, Thu et al., 2011, Cnossen and Richmond, 2013), электродинамических параметров в верхней атмосфере (Lukyayeva and Christiansen, 2006) и так же использоваться при анализе электромагнитных эффектов перед землетрясениями (Duma and Ruzin, 2003).

Эти направления исследований требуют всестороннего знания характеристик регулярных солнечно-суточных Sq вариаций в магнитно-спокойных условиях, особенностей их морфологических закономерностей и долговременных изменений в разных регионах земного шара. Исследователи применяют экспериментальные методы сеть магнитометров (Stening et al., 2005, 2008, Torta et al., 2010) на поверхности Земли и на борту спутника CHAMP (Pedatella, Forbes, and Richmond, 2011) и теоретические расчеты для создания моделей эквивалентных токовых систем Sq . С помощью специальных методик сферического гармонического анализа (Takeda, 2002, Stening, 2008, Yamazaki et al., 2011, Cnossen and Richmond, 2013) были изучены пространственные распределения характеристик Sq вариаций в разные фазы солнечного цикла, особенности морфологических закономерностей на отдельной обсерватории (Thu et al., 2011), а так же их долговременных изменений.

Эмпирическая модель спокойных солнечно-суточных геомагнитных вариаций, определяющая их величину в зависимости от солнечной активности CA , дня года DOY , местного времени LT , фазы луны была создана на основе данных измерений вдоль меридиана $210^\circ E$ с 1996 по 2007 гг. (Yamazaki et al., 2011). Модель описывает контроль солнечной активностью интенсивности глобальной токовой системы, но не положения фокуса эквивалентной токовой системы Sq вариаций. Показаны там же сезонные колебания и северо-южная асимметрия с дополнительными полугодовыми (кроме годовых) вариациями интенсивности токовой системы в южном полушарии. По данным наблюдений на сети из 54 магнитометров над материком Австралии были построены пространственные распределения векторов тока вариаций в южном полушарии для разных моментов UT (всемирного времени). Исследователи выявили наличие наклонов эквивалентной токовой системы Sq вблизи ее фокуса и появление дополнительного восточного токового вихря в утренние часы, который искажает стандартный суточный ход Sq поля на южных широтах, от фокуса к полюсу в зимний сезон (Stening et al., 2005). В отдельных регионах северного полушария (низкоширотная обсерватория Phu Thuy) была обнаружена зимняя аномалия с исчезновением послеполуденного минимума в суточном ходе SqY (Thu et al., 2011). В Антарктике наблюдаемое на обсерватории LIV околоразнополюсное отрицательное возмущение связывают с высокоширотными источниками, с продольными токами, а не со стандартной Sq динамо токовой системой (Torta et al., 2010). Влияния на форму Sq вариаций вторичных токов от ближайших океанических течений и неоднородностей электрической проводимости, возникающих, в том числе, из-за граничных эффектов суши и океана, были обнаружены в расчетах (Kuvshinov, 2008, Yamazaki et al., 2011, Stening, 2008).

С помощью метода сферического гармонического анализа (Takeda, 2002, Kuvshinov, 2008) и модельных CMIT (Coupled Magnetosphere-Ionosphere-Thermosphere) расчетов (Cnossen and Richmond, 2013) глобальных эквивалентных токовых систем Sq были выделены многие свойства Sq . Обнаруженный годовой вихрь с высокоширотным западным током в летнем полушарии и более слабым восточным током в зимнем южном полушарии объясняет наблюдаемый сезонный эффект превалирования значений летних суточных амплитуд Sq вариаций над зимними в более, чем два раза (Yamazaki and Yumoto, 2012). Смещение положения фокуса Sq токовой системы к утренним часам в летнем полушарии и к послеполуденным в зимнем (Takeda, 2002) наблюдается с фазовым сдвигом 1-2 месяца как в результате наложения годовых и полугодовых вариаций Sq , так и атмосферных течений и влияния продольных токов (Yamazaki and Yumoto, 2012). При расчетах глобальных эквивалентных токовых систем Sq (Takeda, 2002) для 02UT в течение одного солнечного цикла 1980-1990 гг было выявлено только два: северный летний тип Sq вариаций, наблюдаемый с апреля по сентябрь и зимний с октября по март. Подобная равноденственная асимметрия Sq так же проявлялась в форме суточных вариаций восточной компоненты магнитного поля в южной полусфере (обсерватория AIA) (Максименко, Шендеровская, 2015).

При изучении источников долговременных вариаций Sq , исследователи (Cnossen and Richmond, 2013, Blas de Haro Barbas et al, 2013, Shinbori et al., 2014) пришли к выводам, что необходимо понимание физических механизмов трендов определяющих Sq параметров ионосферы, которые в свою очередь зависят от вековых вариаций главного магнитного поля, а так же состава и концентрации парниковых газов, изменения электрической проводимости и ветров в цикле солнечной активности. В последние годы (Shinbori et al., 2014) были выделены слабая нелинейная связь амплитуд Sq вариаций от солнечной активности в 53% обсерваторий и появление небольшого отрицательного тренда на разных широтах. Интересны результаты по данным за 100 лет (Takeda, 2013), где, используя сезонные различия UT – зависимости интенсивности двух SqY и SqZ компонент поля, был выявлен тренд Sq , сопровождаемый уменьшением скорости ветров с ростом солнечной активности. Тренд имеет разные знаки, но даже не во всех регионах со значительным уменьшением главного магнитного поля он положительный

С целью определения особенностей морфологических закономерностей солнечно-суточных геомагнитных Sq вариаций на береговой антарктической обсерватории AIA, расположенной в области отрицательного векового тренда главного магнитного поля Земли, был проведен анализ суточных, сезонных и долговременных изменений характеристик Sq вариаций вертикальной и восточной компонент магнитного поля. В работе приведены результаты изучения сезонных и долговременных изменений величин трендов суточных амплитуд SqZ , SqY вариаций по данным измерений на AIA в период 1958-1991 гг.

2. Исходные данные и метод анализа

В этом исследовании используются SqY и SqZ геомагнитные вариации на Украинской антарктической обсерватории AIA Украинской антарктической станции «Академик Вернадский» (65,25S, 64,75W; $\sim 50^\circ$ CGL - corrected geomagnetic latitudes, исправленной геомагнитной широты). Величины суточных амплитуд Sq вариаций вычисляются как разброс часовых значений интенсивностей геомагнитных вариаций Y , Z компонент поля после предварительного вычитания их средних полуночных (22-02LT) значений. Для восточной компоненты магнитного поля - это разница интенсивностей Y в экстремумах ее суточного хода, а для вертикальной - отклонение суточного максимума SqZ от его минимума вблизи захода Солнца. Сезонные вариации и долговременные тренды были определены при использовании среднечасовых и среднемесячных значений суточных амплитуд SqY и SqZ . Вычисления величин трендов суточных амплитуд Sq были выполнены по методу остатков в линейной регрессионном анализе между Sq и индексом солнечной активности (CA) F10,7 (Максименко и др., 2013). Коэффициенты корреляции между Sq вариациями геомагнитного поля и индексами солнечной активности F10,7 были получены для двух элементов поля в течение трех солнечных циклов.

3. Результаты

Особенности наблюдаемых солнечно-суточных геомагнитных Sq вариации обусловлены расположением точки наблюдений (AIA) южнее фокуса южного вихря эквивалентной динамо-токовой системы Sq . На рис. 1а, б показаны кривые суточных изменения часовых значений отклонений вертикальной компоненты магнитного поля от ее полуночного уровня $SqZ=Z-Z(0)LT$ для каждого месяца года за период 1958-1991 гг. Хорошо видны искажения классической формы суточного хода SqZ , характеризующей главным дневным максимумом вблизи полудня. Обратим внимание на появления дополнительного утреннего максимума SqZ в (3÷4)LT, который имеет наибольшее значение в зимний сезон, и отрицательного возмущения SqZ около захода солнца (16÷17)LT с наибольшей интенсивностью в равноденствие. При постепенном удалении от зимы утренний максимум в SqZ вариациях тоже проявляется в отдельные (04) и (09) месяцы равноденствия, которые можно отнести к зимнему типу SqZ вариаций. Величина утреннего максимума относительно суточной амплитуды достигает 50% зимой при очень малых значениях SqZ , и меньше 23% осенью (04), 15% весной (09). По отношению к дневной амплитуде поля Sq динамо-системы, равной соответственно $SqZ=9,1$ нТл в (04) и $SqZ=14,4$ нТл в (09), процент утреннего максимума возмущения тоже увеличивается до 35% осенью (04) и 23% весной (09). Причем, осенью (04) суточный максимум и дневная амплитуда SqZ меньше по сравнению с весной (09), а утренний максимум более плоский и смещен к поздним часам. Утренний максимум так же ярко был выражен в SqY вариациях на AIA (Максименко, Шендеровская, 2015) и обусловлен усилением восточного тока вблизи 7-8LT, которое, следуя за термином, уменьшалось при удалении от июля в зимнем типе SqY вариаций, например, в (05) и отсутствовало в летнем типе (02) на рис. 1б.

В годовых вариациях суточной амплитуды SqZ различия лето-зима могут достигать 5-8 раз. Причем, дневной суточный максимум летом смещен к утру на 1-2 часа относительно его положения зимой. В то же время полугодовые вариации SqZ нельзя выделить четко из-за присутствия равноденственной асимметрии суточной амплитуды относительно (06) месяца. Асимметрия характеризуется усилением SqZ полей токовой системы Sq на 40% весной (09) т.е. 14,4 нТл против 9,1 нТл осенью (04), что вызвано сезонными изменениями интенсивности токовой системы SqZ при зимнем типе Sq вариаций вертикальной компоненты геомагнитного поля (в табл. 1 значения со звездочкой). Однако, вклад сумеречных возмущений, обусловленных вероятно влияниями продольных токов, отличается в суточной амплитуде зимних и летних типов суточного хода Sq , что определяет осенне-весеннюю асимметрию в равноденствие (см. табл. 1). Равноденственная весенне-осенняя (B-O) асимметрия слабее выражена $\Delta SqZ(B-O)/SqZ(B) = 0,16$ в случае классической осени (месяцы 03-04) и весны (09-10), наибольшая асимметрия $\Delta SqZ(04;09)/SqZ(09) = 0,32$ отмечена для зимнего типа вариаций со средней суточной амплитудой $SqZ = 17,9$ нТл (09 и 04). Асимметрия почти отсутствует $\Delta SqZ(03;10)/SqZ(10) = 0,04$ для летнего типа (03 и 10) SqZ вариаций с суточной амплитудой $SqZ = 26,8$ нТл. Иными словами, в летнем (03 и 10) типе SqZ вариаций практически нет асимметрии (относительно 06 месяца), которая достигает 32% для зимнего (04 и 09) типа SqZ .

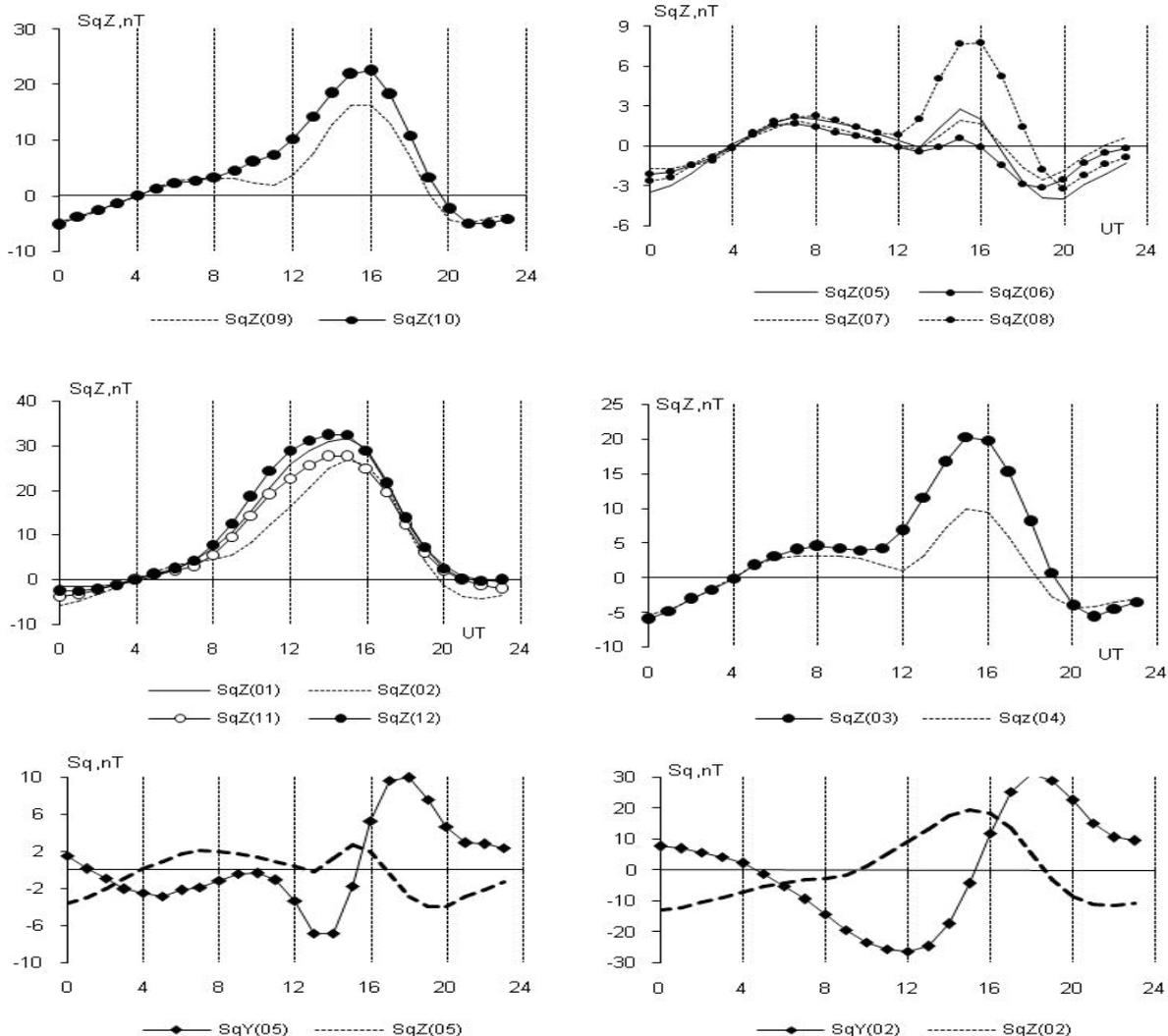


Рис. 1. Графики солнечно – суточных геомагнитных вариаций SqZ , отклонений от полуночных среднечасовых значений вертикальной компоненты магнитного поля для отдельных месяцев (цифры в скобках) четырех сезонов года на AIA за период 1958-1991гг. Сопоставление средних суточных ходов SqZ и SqY для мая и февраля представлено в нижнем ряду.

Fig. 1. Diagrams of the solar-diurnal geomagnetic variations of SqZ , deviations from the midnight hourly values of the vertical component of the magnetic field for individual months (figures in brackets) of the four seasons of the year for AIA for the period 1958-1991. A comparison of the average daily motions SqZ and SqY for May and February is presented in the bottom row.

Таблица 1

Равноденственная (осень-весна) асимметрия суточных амплитуд SqZ вариаций в течение 1958-1991 гг.

Table 1

Equidiurnal (autumn-spring) asymmetry of diurnal amplitudes of SqZ variations during 1958-1991

Тип SqZ вариаций	месяц		SqZ , н Тл. (суточная амплитуда)		Равноден. асим. сут. ампл. SqZ $(B-O)/B$; $SqZ(B) > SqZ(O)$
	Осень(O)	Весна(B)	Осень(O)	Весна(B)	
Классич	03-04	09-10	20,45	24,3	3,9/24,3=0,16
Зимний	04	09	14,6	21,2	6,6/21,2=0,32
Летний	03	10	26,25	27,4	0,9/27,4=0,03
Зимний*	04	09	9,1	14,4	5,3/14,4=0,4

- SqZ для эквивалентной токовой системы.

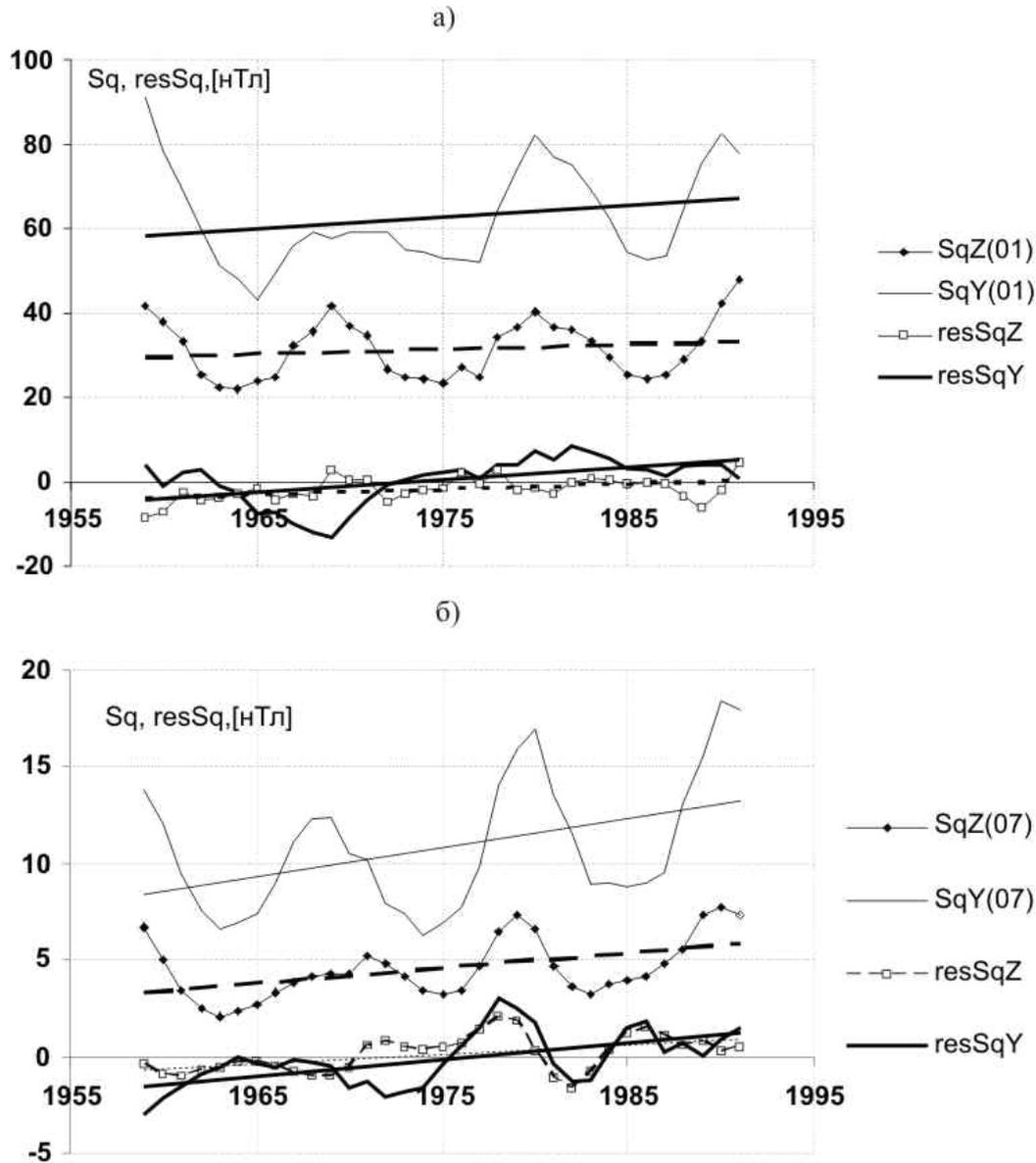


Рис. 2а, б. Долговременные изменения суточной амплитуды SqZ , SqY вариаций и остатков амплитуд $resSqZ$, $resSqY$ после исключения линейной зависимости Sq от индекса SA: а) в летнее (01) и б) зимнее (07) солнцестояние на AIA в течение трех солнечных циклов.

Fig. 2a, b. Long-term changes in the daily amplitude: SqZ , SqY variations and residuals $resSqZ$, $resSqY$ after excluding the linear dependence of Sq from the SA index: a) in the summer (01) and b) winter (07) solstice on AIA for three solar cycles.

Кроме годовых, полугодовых изменений SqZ вариаций были вычислены долговременные изменения суточной амплитуды SqZ в течение трех солнечных циклов 1958-1991 гг. При определении трендов SqZ применялся метод остатков регрессионного анализа, используемый в прежней работе (Максименко и др., 2013) для исключения влияния линейной зависимости суточной амплитуды SqZ вариации от индекса солнечной активности F10,7. Для примера на рис. 2 а, б приведены графики долговременных изменений усредненных для зимнего (07) и летнего (01) месяцев суточных амплитуд геомагнитных вариаций вертикальной SqZ и восточной SqY компонент поля. Там же показаны подобные кривые для остатков $resSqZ$, $resSqY$ суточных амплитуд, полученных после вычитания их зависимости от индекса F10,7 в периоды солнцестояния в течение 33 лет в интервале 1958-1991 гг. На каждой кривой Sq указаны линии трендов на фоне квазициклических колебаний суточной амплитуды Sq в течение 1958-1991 гг. Величины линейного тренда суточных амплитуд для каждого месяца будут использованы позже при анализе изменений величины тренда SqZ на протяжении года. Положительный тренд суточной амплитуды Sq был обнаружен в летнее солнцестояние с величиной тренда летом а(01) $SqY = 0,17$ нТл/год, большей в ~ 2 раза, чем зимой а(06) $SqY = 0,09$ нТл/год. После минимизации влияния солнечной активности на амплитуду Sq вариации (вычитания их линейной зависимости от индекса F10,7) величина тренда уменьшается, но знак тренда изменяется только в отдельные месяцы.

На рис. 3 представлены графические зависимости величины “а” долговременного тренда среднемесячных суточных амплитуд Sq вариаций от номера месяца: для вертикальной компоненты (внизу) и для восточной компоненты.

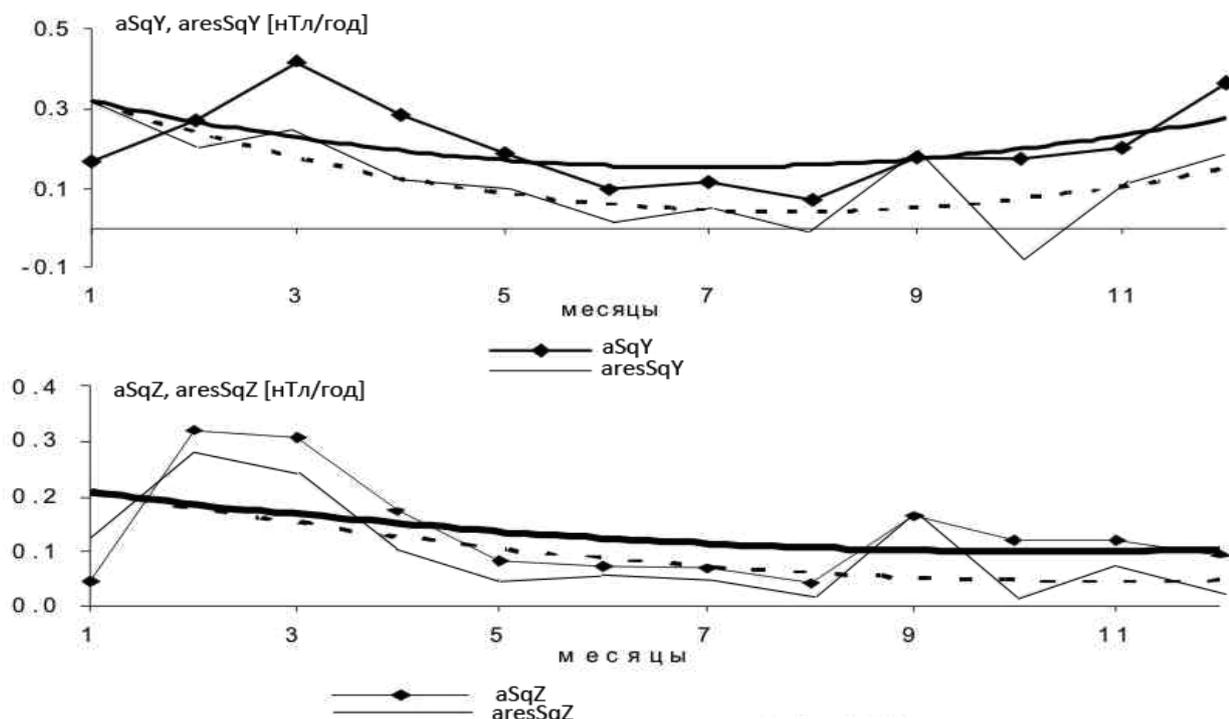


Рис. 3. Годовые изменения величины “а” линейного тренда среднемесячных суточных амплитуд SqZ (внизу), SqY геомагнитных вариаций и величин трендов остатков суточных амплитуд $resSqZ$ и $resSqY$ после вычитания их линейной зависимости от $F10,7$ (индекса солнечного радиоизлучения на длине волны 10,7см) за период 1958-1991гг. Монотонная линия на кривых – полиномиальный тренд второй степени.

Fig. 3. Annual changes in the value “a” of the linear trend of the average month diurnal amplitudes SqZ (bottom), SqY of geomagnetic variations and the values of the residuals $resSqZ$ and $resSqY$ after subtracting their linear dependence on $F10,7$ (solar radio emission index at wavelength 10,7cm) for the period 1958-1991. A monotonic line on curves is a polynomial trend of the second degree.

Здесь показаны сезонные изменения величины тренда “а” суточных амплитуд SqZ и их остатков $resSqZ$ в пределах 0,25 нТл/год на протяжении года. Минимальные величины тренда для обеих суточных амплитуд SqY , SqZ отмечались зимой, а различия тренда амплитуд для “зимнего” и “летнего” типов Sq вариаций – в равноденственные месяцы. Величина тренда суточных амплитуд Sq меняет знак только в отдельные месяцы, например, для SqY в октябре (рис. 3). Средняя картина годовых изменений величины (в нТл/год) положительного тренда амплитуд Sq после минимизации влияния SA была получена с помощью полинома второй степени (монотонные кривые на графиках рис. 3). При этом значительное увеличение величины тренда “а” суточных амплитуд в первую половину года характеризует весенне-осеннюю асимметрию “а” относительно зимних (07;08) месяцев, который имеет большие значения для восточной компоненты магнитного поля (рис. 3, вверху).

Ниже в табл. 2 приведены результаты вычисления величин долговременных трендов суточных амплитуд SqY и SqZ вариаций, усредненных за 12 месяцев, в интервале 1958-1991 гг. Там же показаны значения величины трендов (в нТл/год) и (%), полученные после минимизации влияния солнечной активности (SA). Величины скорректированных трендов были определены для двух моделей зависимости суточных амплитуд Sq от индекса солнечной активности $F10,7$: линейной регрессионной модели связи $Sq = a \cdot (F10,7 + b)$ и степенной модели $Sq = a \cdot (F10,7)^n$. После исключения влияния SA в приближении линейной модели отмечено уменьшение величины тренда в нТл/год суточных амплитуд SqY и SqZ соответственно в 2,2 и 1,7 раз.

Таблица 2

Величины долговременного тренда “а” суточных амплитуд SqY, SqZ вариаций на AIA, усредненных за год в течение 1958-1991гг: для исходных данных и после минимизации влияния SA путем вычитания зависимости Sq (F10,7) в приближении двух регрессионных моделей связи (линейной $Sq = a \cdot (F10,7+b)$ и степенной $Sq = a \cdot (F10,7)^n$)

Table 2

The long-term trend “a” of the daily amplitudes of SqY, SqZ variations on AIA averaged over the year during 1958-1991: for the initial data and after minimizing the influence of SA by subtracting the Sq (F10.7) dependence in the approximation of two regression coupling models (linear $Sq = a \cdot (F10.7 + b)$ and the power $Sq = a \cdot (F10.7)^n$)

Параметр, суточная амплитуда	период	Величина тренда “а”				
		Исходные данные	После минимизации влияния F10,7			
			Sq = a (год)	Линейная модель $Sq = a \cdot F10,7 + b$	Степенная модель $Sq = a \cdot (F10,7)^n$	
					nТл/год	nТл/год
SqY	1958-1991	0.27±0,12	0,117±0,1	0,11±0,07	0,11±0,08	
SqZ	1958-1991	0.17±0.1	0.096±0.07	0,17±0,1	0,2±0.14	

Как видно, значения в % тренда суточных амплитуд несколько различались при выбранных моделях минимизации влияния SA, особенно для вертикальной SqZ вариации. В итоге, положительный тренд среднегодовых суточных амплитуд Sq вариаций за 33 года составил 11% и 17-20%, больше для вертикальной компоненты Sq, с разбросом (60-70)% на AIA. Выяснение причин значительного разброса годовых изменений наклона тренда “а” суточных амплитуд Sq представляет довольно сложную задачу.

4. Дискуссия

4.1 Форма суточных вариаций Sq

Регулярные солнечно-суточные Sq вариации компонент геомагнитного поля можно представить суммой четырех синусоидальных гармоник с периодами 24 часа, 12 часов, 8 часов и 6 часов в соотношении 40%, 30%, 15%, 5% (Yamazaki et al., 2011). Первые две суточная и полусуточная гармоники – это мигрирующие вариации, связанные с солнечными тепловыми приливами, генерирующими динамо – токовые вихри в ионосфере, а 8 час и 6 час гармоники относятся к немигрирующим, локальным возмущениям магнитного поля, имеющим внешние источники разной природы. Изменения в амплитуде и фазе Sq вариации зависят от сезона и солнечной активности и связаны с перемещением положения фокуса токовой системы Sq. Полусуточные приливы достигая 20% могут влиять на интенсивность и форму Sq токовой системы. Кроме этого, отмечаются кратковременные возмущения (< 2 час), которые вызваны атмосферными гравитационными волнами. Расчеты глобальной системы эквивалентных токов Sq вариаций требуют точного знания момента смены направления тока с восточного на западный и, наоборот, в суточном токовом ионосферном вихре на высотах ≈110км. Трудности определения этого параметра по форме Sq вариаций на одной обсерватории приводят к использованию дополнительных сведений о токах и смене направления ветров на этих высотах ионосферы, полученных косвенными, радиофизическими методами. На средних широтах SqY вариации восточной компоненты поля менее чувствительны к пространственным изменениям положения фокуса эквивалентной системы Sq динамо-токов и к изменениям геомагнитной активности (Tortra et al., 2010). Интенсивность геомагнитных SqY вариаций пропорциональна максимальной сумме токов северо-южного направления утром и противоположных токов после полудня (Yamazaki et al., 2011). Вертикальная Z компонента контролируется силой тока Sq вихря над головой в месте наблюдений и является наиболее устойчивой среди трех компонент поля к геомагнитным возмущениям среды. В то же время Z сильно подвержена воздействию вторичных токов, наведенных в результате океанических приливов, берегового эффекта и, неоднородностей проводящей Земли, и зависит от местоположения обсерваторий, например, (Kuvshinov, 2008, Stening et al., 2007, Torta et al., 2010, Takeda, 2013).

Мы рассмотрели сезонные особенности формы SqZ вариаций в спокойные дни, полученные для каждого месяца после усреднения за 33 года на AIA (рис.1). Наблюдался дополнительный утренний максимум интенсивности SqZ в зимнем (04-09) типе суточных вариаций SqZ, достигающий в 3-4LT до 50% от суточной амплитуды SqZ зимой, в июле, и показывающий сезонные уменьшения от (23%) в апреле до (15%) в сентябре, т.е. от осени до весны. Вместе с тем, напротив, суточный максимум и дневная амплитуда SqZ осенью (04) были меньше по сравнению с весной (09), а утренний максимум более плоский и смещен к поздним часам. Утренний максимум SqZ, как и отмечаемые отрицательные возмущения вблизи сумерек в 16-17LT, по-видимому, не были связаны с интенсивностью токовой системы Sq. При этом отметим неполное фазовое соответствие утренних особенностей в формах SqZ и SqY вариаций, к примеру, показанных для (05) месяца на рис. 1 и в (Максименко и др., 2015), которое требует специального изучения в будущем. По аналогии с результатами (Stening et al., 2005) дополнительный утренний максимум SqZ, вероятно, может быть вызван утренним восточным токовым вихрем, который впервые был обнаружен над южной Австралией на широтах южнее фокуса токовой системы Sq. Это проявление так называемой ‘M’ формы солнечно-суточных Sq вариаций горизонтальной компоненты магнитного поля, которая обусловлена утренним усилением восточ-

ного тока с ростом широты и не связана с токовой системой Sq (Stening, 2008). Другие искажающие суточный ход SqZ и SqY немигрирующие флуктуации, вызванные береговым эффектом, по-разному проявлялись на западном и восточном материковом контуре Австралии в широтном диапазоне $\sim(20-30)S$, показаны в (Stening, Reztsova, 2007). Предварительный детальный анализ особенностей формы суточного хода Sq важен в процессе выбора количественных характеристик Sq, которые используются при изучении источников долговременных изменений SqY, SqZ и их сезонных различий (Stening, 2008, Torta et al., 2010, Takeda, 2013).

4.2. Сезонные и годовые изменения характеристик Sq вариаций

Известно, что суточные солнечные тепловые течения генерируют в присутствии магнитного поля Земли два вихря токов противоположных направлений, по часовой стрелке и против соответственно в освещенной ионосфере северного и южного полушарий. Проведенный анализ годовых изменений среднемесячных суточных амплитуд SqZ < (0,3-0,5) SqY вариаций, вертикальной и горизонтальной компонент поля, усредненных за три солнечных цикла, выделил соответствующие минимумы (4нТл и 12нТл) зимой (06-07), летние (11-02) максимумы (31нТл и 60нТл) амплитуд и намечающееся плато амплитуд в октябре-ноябре для восточной компоненты. При этом годовые амплитуды Sq различались в 1,8 раза для вертикальной и восточной компонент поля, равнясь 27нТл и 48нТл на AIA в интервале 1958-1991 гг. Согласно расчетам (Yamazaki, Yumoto, 2012) годовой одиночный вихрь в декабрьском солнцестоянии, с усиленным западным током в южном летнем полушарии, при слабом восточном токе в северном зимнем полушарии объясняют большую интенсивность Sq токов в летнем полушарии по сравнению с зимним.

Особенности годовых изменений суточных амплитуд SqZ вариаций можно рассмотреть на схеме распределения среднемесячных суточных амплитуд, представленных в изолиниях равных амплитуд SqZ в течение трех циклов солнечной активности 1958-1991 гг на рис. 4. Обнаруженная равноденственная асимметрия (относительно июня) среднемесячных значений суточных амплитуд SqZ (табл. 1 и рис. 4) вызвана существованием практически двух (“летнего” и “зимнего”) типов Sq вариаций, наблюдаемых соответственно с 10 по 03 и с 04 по 09 месяцы года на AIA.

При этом весенне-осенняя разница амплитуд Sq полей системы динамо токов достигала максимум (32- 40)% только в зимнем (04 и 09) типе SqZ вариаций с превышением весенних (09) амплитуд Sq над их осенними значениями (04). Эта асимметрия не находит объяснения в рамках существующих механизмов формирования полугодовых максимумов геомагнитных Sq вариаций (Yamazaki, Yumoto, 2012). Так, полугодовые изменения южной компоненты магнитного поля солнечного ветра Vz IMF показывают максимумы вблизи 5 апреля, а геомагнитной активности, измеренной индексом aa, имеют максимумы от 21 марта до 5 апреля.

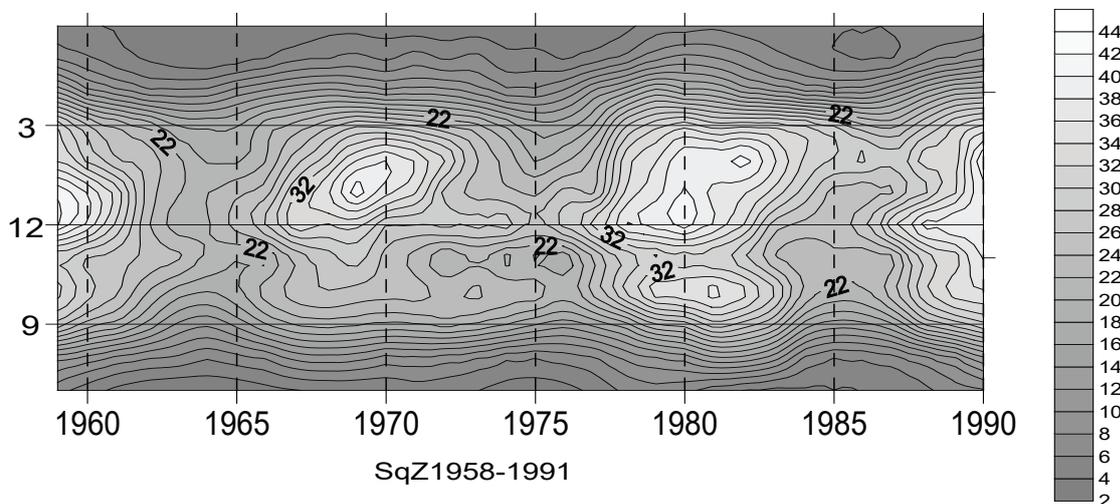


Рис. 4. Схема межгодовых распределений сезонных изменений суточных амплитуд SqZ вариаций в изолиниях равных значений (цифры в нТл) на AIA в течение 1958-1991гг. Ось ординат – месяцы.

Fig. 4. Diagram of interannual distributions of seasonal variations in daily amplitudes of SqZ variations in isolines of equal values SqZ (digitals in nT) at AIA during 1958-1991. The axis of ordinates is months.

С другой стороны, согласно расчетов (Yamazaki et al., 2011, Yamazaki, Yumoto, 2012) сезонные изменения глобальной эквивалентной токовой системы являются результатом наложения стационарной, полугодовой и годовой компонент Sq вариаций. Из них первые два компонента сопровождаются дневными вихрями тока в каждом полушарии, а годовые вариации имеют одиночный вихрь, центрированный в экваториальном районе в утреннее время. В результате получается, что полугодовая компонента достигает максимума на 10 дней раньше 21 марта, момента равноденствия, а годовая – через 7 дней от точки солнцестояния 21 июня. Авторы приходят к выводу, что вследствие таких временных смещений остаточные явления равноденственных максимумов геомагнитной активности весьма слабые и не могут проявиться в сезонных изменениях среднемесячных амплитуд Sq. В то же время асимметрия весна-осень для дневных Sq в северном полушарии часто связывалась с полугодовыми вариациями ветровых систем, смещенных на 1-2 месяца от

точки равноденствия (Thu et al., 2011, Stening, 2008, Takeda, 2002). Системы нейтральных ветров вместе с межполушарными продольными токами и вековыми вариациями магнитного поля (Яременко, 2004) определяют как северо-южную асимметрию, так и полугодовые вариации положения фокуса Sq систем (Takeda, 2002, Thu et al., 2011). Однако, в долговременных изменениях Sq , кроме важной роли нейтральных ветров, большое значение имеет влияние ионосферной проводимости, контролируемой уровнем солнечной активности, и геомагнитного поля в зависимости от уровня магнитного момента Земли (Cnossen, Richmond, Wiltberger, 2012).

4.3 Долговременные изменения Sq

Долговременные изменения суточных амплитуд Sq сохраняют квази-колебательный характер с периодом солнечного цикла во все месяцы года, следуя за изменениями индекса SA. Однако, сезонные колебания величин “а” линейных трендов среднемесячных суточных амплитуд вертикальной SqZ и восточной SqY вариаций, различающихся в 2-5 раза в течение 33 лет, не полностью совпадают (рис. 2, 3, 4). При этом величина положительного тренда “а” суточных амплитуд Sq изменялась в пределах 0,25 нТл/год. Летом тренд сильнее, чем зимой. Кроме того, наблюдались различия “а” для “зимнего” (04;09) и “летнего” (03;10) типов Sq вариаций в равноденственные периоды. Минимальные величины трендов отмечались зимой, а отрицательные тренды в октябре для SqY вариаций. В средней картине годовых изменений “а”, полученной с помощью полинома второго порядка (монотонные линии на кривых Sq , рис. 3), удалось выделить весенне-осеннюю асимметрию “а” с увеличением величины тренда в первую половину года, причем, значительно большей для восточной SqY компоненты после исключения влияния солнечной активности.

Сезонные колебания величин 33-х летнего тренда среднемесячных суточных амплитуд Sq вариаций, очевидно, привели к 60-70% разбросу значений величин тренда среднегодовых амплитуд. Полученные после минимизации влияния солнечной активности величины положительных трендов составляли 11% для восточной и больше, 17-20% для вертикальной компоненты поля, уменьшившись соответственно в 2,2 и 1,7 раз на AIA в интервале 1958-1991 гг. Отмеченное различие величины трендов для восточной и вертикальной компонент магнитного поля сопровождалось более сильной корреляцией между изменениями амплитуд SqY и индексов $F10,7$ и сезонными колебаниями показателей связи Sq с SA для обеих компонент поля. Разный сезонный вклад долготных вариаций термосферных приливов на SqY и SqZ был получен из анализа данных наблюдений магнитного поля на спутнике CHAMP с учетом силы и ориентации магнитного поля Земли и немигрирующих приливов в нижней термосфере в условиях спокойного Солнца (Pedatella, Forbes, Richmond, 2011). При уменьшении интенсивности геомагнитного поля увеличивается электрическая проводимость в ионосфере, что естественно объясняет положительный тренд амплитуд Sq на AIA до конца прошлого столетия (Максименко и др., 2013). С другой стороны ионосферная проводимость увеличивается с ростом SA, которая в 23 солнечном цикле снизилась на 20%, что и приводит (не показано) к появлению слабого отрицательного тренда суточных амплитуд Sq за последние 54 года 1958-2013 гг на AIA.

С другой стороны сравнения результатов экспериментальных и модельных исследований долговременных трендов с применением электродинамической модели общей циркуляции Thermosphere-Ionosphere-General Circulation Model (TIE-GCM) и Coupled Magnetosphere-Ionosphere-Thermosphere (CMIT) модели (Cnossen, Richmond, Wiltberger, 2012, Cnossen and Richmond, 2013, Shinbori et al., 2014) в большинстве обсерваторий показали превышение наблюдаемых величин тренда Sq над расчетными. При этом доминирующая роль в увеличении величины тренда Sq вариаций была отведена изменениям интенсивности магнитного поля, проявляющимся через широтные изменения ионосферной проводимости (Shinbori et al., 2014). Теоретически исследованы также отклики системы взаимодействующих геосфер (магнитосфера – ионосфера – термосфера) на вековое уменьшение магнитного дипольного момента Земли $(8-6)10^{22}Am^2$ (Cnossen, Richmond, Wiltberger, 2012). Выявлена при этом ступенчатость связи ионосферной проводимости и суточных амплитуд Sq вариаций трех компонент магнитного поля с индексом $F10,7$, которая контролируется уровнем магнитного момента Земли. Это объясняет разнообразие величин наблюдаемых долговременных трендов Sq в разных регионах, подтверждая сложность проблемы определения истинных долговременных трендов Sq .

В (Yamazaki and Kosch, 2014) приводится, что показатель связи Sq с $F10,7$ чуть больше, чем $(F10,7)^{0,5}$ вдоль меридиана 210° , а в почти сопряженных точках Kakioka ($36,2N$) и Gnanqaga ($31,8S$) для выбранных полугодовых и годовых гармоник Sq получена линейная связь с числом солнечных пятен (Yamazaki, Yumoto, 2012). В то же время минимизация влияния SA путем вычитания зависимости второго порядка Sq от $F10,7$ привела к выявлению отрицательного тренда Sq в отдельных регионах для 53% обсерваторий, расположенных, к примеру, в восточной Канаде, Европе, Индии, где отмечались большие вековые вариации магнитного поля (Shinbori et al., 2014). Разнообразие характера связи Sq с солнечной активностью, $F10,7$, в том числе, полученные в работе величины трендов амплитуд Sq для линейной и степенной регрессионных моделей связи Sq с $F10,7$ (табл. 2), оставляет открытым вопрос оптимизации методов исключения влияния солнечной активности на Sq , которые используются при определении истинных трендов амплитуд Sq в разных временных интервалах и регионах мира.

Наряду с контролем солнечной активности необходимо исследовать вклад региональных источников в величину трендов Sq : вековых вариаций геомагнитного поля в первую очередь, затем структурных неоднородностей ионосферной проводимости, электронной концентрации и внешних немигрирующих возмущений, связанных с динамическими процессами в верхней стратосфере и нижней термосфере (Cnossen and Richmond, 2013, Takeda, 2013). Последние легче проявляются в зимний сезон, когда в большинстве случаев (Torta et al., 2010, Thu et al., 2011, Stening, 2008) могут регистрироваться слабые и отрицательные сигналы Z амплитуд солнечно-суточных вариаций Sq , а возмущения приводят к сильным искажениям стандартного суточного хода SqZ .

В этой связи изучение источников региональных годовых, сезонных изменений величины трендов Sq представляет самостоятельную задачу и требует длительных рядов данных наблюдений с учетом параметров солнечного ветра и V_y компоненты ММП в разные фазы солнечной активности для использования не только усредненных, а ежедневных амплитуд суточных Sq вариаций всех компонент магнитного поля, в том числе, на близлежащих AIA береговых обсерваториях.

5. Выводы

Свойства солнечно-суточных Sq вариаций были выявлены из данных мониторинга геомагнитного поля в районе отрицательных ВВ вариаций геомагнитного поля, на обсерватории AIA в период 1958-1991 гг. Сезонные и долговременные особенности SqZ вариаций были получены из анализа формы суточного хода SqZ вертикальной компоненты поля. Дополнительный утренне-ночной максимум SqZ , обнаруженный в 3-4LT в “зимнем” (04-09) типе SqZ вариаций, составил ~ 50% от суточной амплитуды SqZ в июне, 15% в сентябре (09), что меньше, чем 23% осенью (04). Этот максимум, вероятно, обусловлен утренним восточным вихрем тока, что впервые был зарегистрирован над южной Австралией. Вместе с отрицательным возмущением Sq в сумерки 16-17LT, наблюдаемым так же на близлежащей обсерватории LIV, утренний максимум SqZ не связаны ни с солнечной Sq , ни с полярной Sq^p токовыми системами. Выделенная осенне-весенняя асимметрия (относительно 06 месяца) суточных амплитуд Sq вариаций вертикальной компоненты поля отражает отсутствие равноденственного типа суточного хода SqZ и характеризуется весенним (32-40)% превышением амплитуд поля Sq системы токов, заметным только для зимнего (04 – 09) типа SqZ вариаций на AIF.

Определены разные годовые изменения величин долговременных трендов среднемесячных суточных амплитуд SqZ и SqY вариаций менее 0,25 нТл/год. Отмечается весенне-осенняя асимметрия величины тренда при усилении тренда в первую половину года, летом и спад зимой, различие величины тренда для “летнего” (03 и 10) и “зимнего” (04 и 09) типов суточного хода SqZ вариаций для равноденственных месяцев. Вычислены величины положительных долговременных трендов среднегодовых суточных амплитуд Sq вариаций, составляющие 11% для восточной SqY и больше, 17-20% для вертикальной SqZ компонент магнитного поля на AIA в интервале 1958-1991 гг. наблюдаются различные уменьшения величины тренда годовых значений амплитуд SqY и SqZ вариаций соответственно в 2,2 раза и в 1,7 раз после минимизации влияния солнечной активности (SA) в приближении линейной регрессионной зависимости Sq от индекса $F10,7$. Разброс величины тренда среднегодовых амплитуд Sq вариаций (до 70%) обусловлен, в основном, сезонными вариациями определяющих амплитуду Sq параметров (электрической проводимости, интенсивности магнитного поля, концентрации парниковых газов, термосферных ветров, температуры и т.д.). В дальнейшем предполагается проанализировать свойства Sq в зависимости от изменений M - магнитного момента Земли, которые различны для лет максимумов и минимумов солнечного цикла. Остается также неясной роль немигрирующих геомагнитных колебаний.

6. Благодарности

Авторы благодарны исследователям Государственного учреждения Национальный антарктический научный центр МОН Украины и магнитной обсерватории “Аргентинские острова” за качественные данные геомагнитных вариаций, представляемые в систему INTERMAGNET.

7. Литература

1. Максименко О.И., Бахмутов В.Г., Килифарска Н. А., Шендеровская О.Я. Трендовые изменения геомагнитного поля на обсерватории “Аргентинские острова” – эффект в Sq -вариациях. *Украинский антарктический журнал*. 2013. № 12. С. 62-68.
2. Максименко О.И., Шендеровская О.Я. Геомагнитные солнечно-суточные вариации в Антарктике. Связь с солнечной активностью. *Украинский антарктический журнал*. 2014. №13. С. 67-74.
3. Максименко О.И., Шендеровская О.Я. Особенности формы солнечно-суточных геомагнитных SqY вариаций над Антарктикой *Междисциплинарные исследования в науке образовании*. 2015. № 3Н. mino.esrae.ru/hdf/2016/5sp/1541.doc.
4. Яременко Л.Н., Мищенко Ю.П., Шендеровская О.Я. Главное магнитное поле и вековые вариации в пределах мантии Земли. *Геофизический журнал*. 2004. Т.26. №. 1. С.117–122.
5. Blas de Haro Barbas, B.F., Elias, A.Q., Cnossen I., Zossi de Artigas, M., 2013. Long-term changes in solar quiet (Sq) geomagnetic variations related to Earth’s magnetic field secular variation. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, 3712–3718. DOI:10.1002/jgra.50352.
6. Cnossen, I., Richmond, A.D., Wiltberger, M., 2011. The dependence of the coupled magnetosphere-ionosphere-thermosphere system on the Earth’s magnetic dipole moment. *J. Geophys. Res.*, 117, A05302. DOI:10.1029/2012JA017555.
7. Cnossen, I., Richmond, A. D., 2013. Changes in the Earth’s magnetic field over the past century: Effects on the ionosphere-thermosphere system and solar quiet (Sq) magnetic variation. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, 849–858. DOI: 10.1029/2012JA018447.
8. Duma, Q., 2003. Ruzhin Diurnal changes of earthquake activity and geomagnetic Sq -variations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 171–177.

9. Kuvshinov, A.V., 2008. 3-D global induction in the oceans and solid Earth: Recent progress in modeling magnetic and electric fields from sources of magnetospheric, ionospheric and oceanic origin. *Surv. Geophys.*, 29, 139–186.
10. Lukianova, R. and Christiansen, F., 2006. Modeling of the global distribution of ionospheric electric fields based on realistic maps of field-aligned currents. *J. Geophys. Res.*, 111, A3. DOI: 10.1029/2005JA011465.
11. Pedatella, N.M., Forbes, J.M. and Richmond, A.D., 2011. Seasonal and longitudinal variations of the solar quiet (Sq) current system during solar minimum determined by CHAMP satellite magnetic field observations. *J. Geophys. Res.*, 116, A04317, DOI:10.1029/2010JA016289.
12. Shinbori, et al., 2014. Long-term variation in the upper atmosphere as seen in the geomagnetic solar quiet daily variation. *Earth, Planets and Space*, 66, 155. <http://www.earth-planets-space.com/66/1/155>.
13. Stening, R. J., 2008. The shape of the Sq current system. *Ann. Geophys.*, 26, 1767–1775.
14. Stening, R.J., Reztsova, T., Ivers, D., Turner, J. and Winch, D., 2005. Morning quiet-time ionospheric current reversal at mid to high latitudes. *Annales Geophysical*, 23, 385–391.
15. Stening, R.J. and Reztsova, T. 2007. The daily variations of the vertical (Z) element of the Geomagnetic field around the coast of mainland Australia. *Earth Planets Space*, 59, 579–584.
16. Takeda, M., 2002. Features of global geomagnetic Sq field from 1980 to 1990. *J. Geophys. Res.* DOI:10.1029/2001JA009210.
17. Takeda, M., 2013. Difference in seasonal and long-term variations in geomagnetic Sq fields between geomagnetic Y and Z components. *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 118, 5, 522–2526. DOI:10.1002/jgra.50128.
18. Thu H. Pham Thi, Amory-Mazaudier, C., Le Huy, M. 2011. Sq field characteristics at Phu Thuy, Vietnam, during solar cycle 23: comparisons with Sq field in other longitude sectors. *Annales Geophysical*, 29, 1–17. <http://www.ann-geophys.net/29/1/2011/> DOI:10.5194/angeo-29-1-2011.
19. Torta, J., Cantiaño Marcal, Curto, Juan J et al., 2010. Behaviour of the quiet-day geomagnetic variation at Livingston Island and variability of the Sq focus position in the South American-Antarctic Peninsula region. *Earth Planets Space*. 62, 297–307.
20. Yamazaki, Y., Yumoto, K., Cardinal M. et al., 2011. An empirical model of the quiet daily geomagnetic field variation. *J. Geophys. Res.* 116, A10. DOI: 10.1029/2011JA016487.
21. Yamazaki and Yumoto. 2012. Long-term behavior of annual and semi-annual Sq variations. *Earth Planets Space*. 64, 417–423.
22. Yamazaki, Y., Kosch, M.J., 2014. Geomagnetic lunar and solar daily variations during the last 100 years. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119, 8. DOI:10.1002/2014JA020203.

8. References

1. Maksymenko, O.I., Bakhmutov, V.G., Kilifarska, N., Shevderovskaja, O.Ya. 2013. Trendovye izmeneniya geomagnitnogo polja na observatorii "Argentinskije ostrova"- efekt v Sq-variantiiah [Trend changes in the geomagnetic field at the Argentine Islands observatory - effect in Sq-variations]. *Ukrainskij Antarktichnyj Zhurnal* [Ukrainian Antarctic Journal], 12, 62-68
2. Maksymenko, O.I., Shevderovskaja, O.Ya. 2014. Geomagnetnye solnechno-sutochnye variantiysi v Antarktike. Sviaz s solnechnoi aktivnostu [Geomagnetic solar-diurnal variations in the Antarctic. Relationship with solar activity]. *Ukrainskij Antarktichnyj Zhurnal* [Ukrainian Antarctic Journal], 13, 67-74.
3. Maksymenko, O.I., Shevderovskaja, O.Ya. 2015. Osobennosti formy solnechno-sutochnyh geomagnitnykh SqY-variantiis nad Antarktikoju [Features of the form of solar-daily geomagnetic SqY variations over the Antarctic]. *Mezhdistyplinarnye issledovaniia v nauke i obrazovanii* [Interdisciplinary research in science and education], 3, H. mino.esrae.ru/hdf/2016/5sp/1541.doc
4. Yaremko, L.N., Mishchenko, Yu.P., Shevderovskaja O.Ya. 2004. Glavnoe magnitnoe pole i vekovye variantiisii v predelakh zemli [The main magnetic field and age-old variations within the Earth's mantle]. *Geofizicheskii zhurnal* [Geophysical Journal], 26, 1, 117–122.
5. Blas de Haro Barbas, B.F., Elias, A.Q. Cnossen I., Zossi de Artigas, M. 2013. Long-term changes in solar quiet (Sq) geomagnetic variations related to Earth's magnetic field secular variation. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, 3712–3718. DOI:10.1002/jgra.50352.
6. Cnossen, I., Richmond, A.D. Wiltberger, M. 2011. The dependence of the coupled magnetosphere-ionospheric system on the Earth's magnetic dipole moment. *J. Geophys. Res.*, 117, A05302. DOI:10.1029/2012JA017555.
7. Cnossen, I., Richmond, A. D. 2013. Changes in the Earth's magnetic field over the past century: Effects on the ionosphere-thermosphere system and solar quiet (Sq) magnetic variation. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, 849–858. DOI: 10.1029/2012JA018447.
8. Duma, Q. 2003. Ruzhin Diurnal changes of earthquake activity and geomagnetic Sq-variations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 171–177.
9. Kuvshinov, A.V. 2008. 3-D global induction in the oceans and solid Earth: Recent progress in modeling magnetic and electric fields from sources of magnetospheric, ionospheric and oceanic origin. *Surv. Geophys.*, 29, 139–186.
10. Lukianova, R. and Christiansen, F., 2006. Modeling of the global distribution of ionospheric electric fields based on realistic maps of field-aligned currents. *J. Geophys. Res.*, 111, A3. DOI: 10.1029/2005JA011465.
11. Pedatella, N.M., Forbes, J.M. and Richmond, A.D. 2011. Seasonal and longitudinal variations of the solar quiet (Sq) current system during solar minimum determined by CHAMP satellite magnetic field observations. *J. Geophys. Res.*, 116, A04317, DOI:10.1029/2010JA016289.
12. Shinbori, et al. 2014. Long-term variation in the upper atmosphere as seen in the geomagnetic solar quiet daily variation. *Earth, Planets and Space*, 66, 155. <http://www.earth-planets-space.com/66/1/155>.
13. Stening, R. J. 2008. The shape of the Sq current system. *Ann. Geophys.*, 26, 1767–1775.

14. Stening, R.J, Reztsova, T., Ivers, D., Turner, J. and. Winch, D. 2005. Morning quiet-time ionospheric current reversal at mid to high latitudes. *Annales Geophysical*, 23, 385–391.
15. Stening, R.J. and Reztsova, T. 2007. The daily variations of the vertical (Z) element of the Geomagnetic field around the coast of mainland Australia. *Earth Planets Space*, 59, 579–584.
16. Takeda, M. 2002. Features of global geomagnetic Sq field from 1980 to 1990. *J. Geophys. Res.*, 107, 4-8. DOI:10.1029/2001JA009210.
17. Takeda, M. 2013. Difference in seasonal and long-term variations in geomagnetic Sq fields between geomagnetic Y and Z components. *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 118, 5, 522–2526. DOI:10.1002/jgra.50128.
18. Thu H. Pham Thi, Amory-Mazaudier, C., Le Huy, M. 2011. Sq field characteristics at Phu Thuy, Vietnam, during solar cycle 23: comparisons with Sq field in other longitude sectors. *Annales Geophysical*, 29, 1–17. www.ann-geophys.net/29/1/2011/ DOI:10.5194/ angeo-29-1-2011.
19. Torta, J., Cantiaqo Marcal., Curto, Juan J et al. 2010. Behaviour of the quiet-day geomagnetic variation at Livingston Island and variability of the Sq focus position in the South American-Antarctic Peninsula region. *Earth Planets Space*, 62, 297–307.
20. Yamazaki, Y., Yumoto, K., Cardinal M. et al. 2011. An empirical model of the quiet daily geomagnetic field variation. *J. Geophys. Res.* 116, A10. DOI: 10.1029/2011JA016487.
21. Yamazaki and Yumoto. 2012. Long-term behavior of annual and semi-annual Sq variations. *Earth Planets Space*, 64, 417–423.
22. Yamazaki, Y., Kosch, M.J. 2014. Geomagnetic lunar and solar daily variations during the last 100 years. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119, 8. DOI:10.1002/2014JA020203.