

УДК 550.382:385

## ГЕОМАГНИТНЫЕ СОЛНЕЧНО-СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ В АНТАРКТИКЕ, СВЯЗЬ С СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

*О.И. Максименко, О.Я. Шендеровская*

*Институт геофизики им. С.И. Субботина, Национальная Академия наук Украины,  
oimkv@list.ru*

По данным мониторинга вариаций геомагнитного поля за период 1958–1991 гг., изучены зависимости амплитуд Sq вариаций горизонтальной и вертикальной компонент магнитного поля от индекса F10,7 на Украинской антарктической станции 'AIA'. На фоне высокой корреляции  $r(Sq; F10.7) = 0,72-0,92$  с помощью регрессионного анализа определены увеличения наклона ('a') линии регрессии в летний период и на фазе роста солнечного цикла, годовые (лето-зима) колебания ('b') суточных амплитуд Sq вариаций при минимальных индексах F10.7. Обнаружено, что величины отношений 'a/b' для Z, Y компонент поля не постоянные, как принято в сферической гармонической модели Sq поля (CM4), а показывают, кроме выбросов в отдельные месяцы, смену знака в зимний период. Построены диаграммы годовых изменений месячных эмпирических значений суточных амплитуд SqY и SqZ вариаций и индекса F10,7, отражающие их подобие в годы максимумов CA, и циклические особенности в солнцестояние в течение 33-х лет.

### **Геомагнітні сонячно-добові варіації в Антарктиці, зв'язок із сонячною активністю**

*О.І. Максименко, О.Я. Шендеровська*

**Реферат.** За даними моніторингу варіацій геомагнітного поля за період 1958–1991рр., вивчено залежність амплітуд Sq варіацій горизонтальної і вертикальної компонент магнітного поля від індексу F10,7 на Українській антарктичній станції 'AIA'. На фоні високої кореляції  $r(Sq; F10.7) = 0,72-0,92$  за допомогою регресивного аналізу визначено збільшення нахилу ('a') лінії регресії в літній період і на фазі росту сонячного циклу, річні (літо-зима) коливання ('b') добових амплітуд Sq варіацій при мінімальних F10.7. Виявлено, що величини відношення 'a/b' для Z, Y компонент поля не постійні, як прийнято у сферичній гармонічній моделі Sq (CM4), а показують, окрім викидів в окремі місяці, зміну знаку в зимовий період. Побудовано діаграми річних змін місячних емпіричних значень добових амплітуд SqY і SqZ варіацій та індексу F10,7, які відтворюють їх подібність у роки максимумів CA, й циклічні особливості упродовж 33-х років.

### **Geomagnetic solar-diurnal variations at the Antarctica, the relationship with solar activity**

*О.І. Maksimenko, О. Ya. Shenderovska*

**Abstract.** According to the monitoring of variations of the geomagnetic field over the period 1958-1991, Sq-variation amplitudes of horizontal and vertical components of the magnetic field depending of the index F10.7 have been studied at the Ukrainian Antarctic station 'AIA'. Against the background of the high correlation  $r(Sq; F10.7) = 0,72-0,92$  using regression analysis to determine the increase of inclination ('a') of the regression line in the summer and on the growth phase of the solar cycle, annual (summer and winter) fluctuations ('b') daily amplitude of Sq-variations upon minimal F10.7. It was found that the ratio 'a / b' for Z, Y component of the field is not constant, as is customary in the spherical harmonic model Sq (CM4), and in addition shows emissions in some months and the change of sign in the winter. Diagrams of annual changes monthly empirical values of diurnal amplitudes SqY, SqZ variations and index F10.7, are reflecting their similarity in the years of maximum CA and a cyclic characteristics during 33 years on the AIA.

**Keywords:** Sq-variations of the geomagnetic field, solar activity indices, the regression coefficients.

## 1. Введение

Регулярные солнечно-суточные Sq вариации магнитного поля рассчитываются по сферической гармонической модели Sq поля (СМ4) [Sabaka et al., 2004], созданной на основе данных мировых наблюдений суточных вариаций компонент магнитного поля. Каждый коэффициент модели СМ4 умножается на фактор  $1 + N F10.7$ , где линейная зависимость Sq от солнечной активности представлена постоянным коэффициентом  $N=a/b$  [см. также Penquerc'h et al., 2011], где  $N = 14,85 \cdot 10^{-3} (10^{-22} \text{ Wm}^2\text{Hz}^{-1})^{-1}$ ; a, b – коэффициенты линейной регрессии между Sq и индексом CA. При изучении характера связи Sq с F10.7 автор [Hibberd, 1985], используя данные разницы SqH для пары обсерваторий, разнесенных вдоль меридиана по разные стороны фокуса токовой системы, что почти исключает магнитосферные возмущения, показал существование линейной зависимости между  $\Delta SqH$  и F10.7 с бóльшим наклоном в равноденствие, чем в солнцестояния в интервале 1962–1971 гг. В [Penquerc'h et al., 2011] с помощью метода [Hibberd, 1985] были обнаружены вариации коэффициентов линейной аппроксимации  $\Delta Hdr = a F10.7 + b$  в течение 1986–2007 гг.: полугодовые изменения наклона 'a' и годовой ход отношения a / b, более наглядные в условиях минимальной солнечной деятельности. Усиление интенсивности Sq отмечалось в летний сезон и вблизи годов максимумов солнечной активности 1950, 1980, 1991, 2001 в ряде работ [Macmillan et al., 2007, Torta et al., 2010]. Причем в [Torta et al., 2010] была выявлена линейная связь F10.7 с восточной компонентой SqY в отдельные фазы цикла на антарктической станции LIV (62,67S 60,4W).

Согласно эмпирической модели Sq вариаций [Yamazaki et al., 2011], интенсивность SqH представляется функцией широты, дня года, локального времени, солнечной активности и термосферных нейтральных ветров. Причинами кратковременных искажений формы SqH вариации могут быть наклоны токовой системы или дополнительные токи неизвестных источников, возникающие в утренних секторах в умеренных широтах [Stening, 2008], а также внутренние волны, вызванные, к примеру, процессами внезапных зимних потеплений [Yamazaki et al., 2012], максимальных в 2008-2009 годах на низких широтах.

Считается [Takeda et al., 2003], что долговременные тренды локальных SqY вариаций магнитного поля повторяют характеристики проводимости ионосферы, тогда как различия вариаций электрических динамо-полей приписывают локальным вековым вариациям магнитного поля при равных нейтральных ветрах [Takeda, 2013]. При этом основные изменения амплитуд Sq вариаций определяются изменениями солнечной активности (коэффициенты корреляции довольно большие), и вклад других факторов во временные изменения Sq вариаций (в частности, в их тренд) можно оценить после исключения влияния фактора с наибольшим вкладом (F10.7) [Максименко и др., 2013].

В работе приведены результаты анализа сезонных изменений коэффициентов связи между индексом солнечной активности F10.7 и амплитудами геомагнитных SqZ, SqY вариаций, которые могут использоваться при определении истинных трендов Sq, исключая влияние солнечной активности на береговой Украинской антарктической обсерватории в течение 1958–1991 гг. Обсуждаются циклические и сезонные изменения Sq вариаций геомагнитного поля под контролем индекса CA.

## 2. Исходные данные

Анализ построен на данных среднечасовых наблюдений Z, Y компонент геомагнитного поля на обсерватории AIA за период 1958–1991 гг., сформированных в массивы солнечно-суточных Sq(UT)-вариаций для пяти международных магнитно-спокойных дней каждого месяца года в течение всего исследуемого диапазона. На основе среднечасовых значений Sq вариаций был проведен морфологический анализ в цикле солнечной активности и выявлены моменты экстремумов суточного хода Sq горизонтальной и вертикальной компонент поля (см. рис. 1).

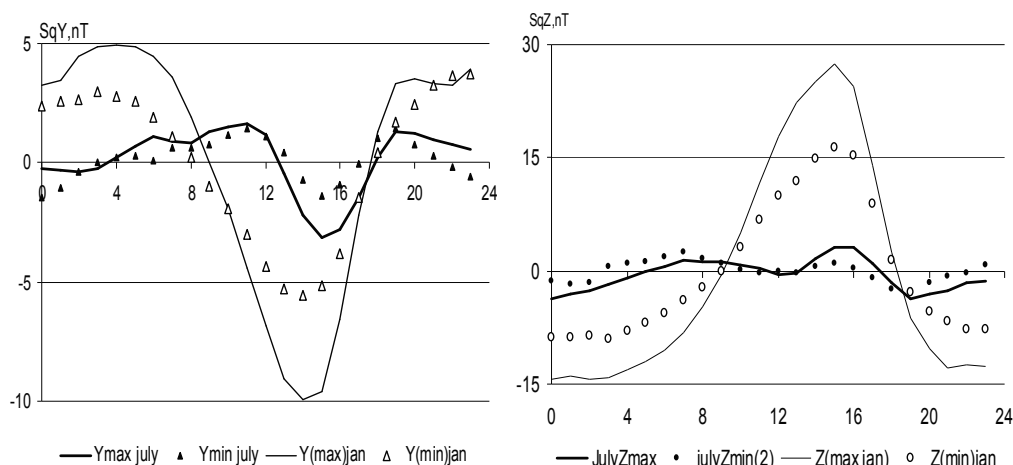


Рис. 1. Средние суточные изменения Sq вариаций Y (слева), Z (справа) компонент магнитного поля в годы максимума и минимума солнечной активности для двух месяцев лета (01) и зимы (07) на обсерватории AIA в период 1958–1991 гг.

Для количественной характеристики солнечно-суточных Sq вариаций Y, Z компонент магнитного поля определялись их суточные амплитуды как разница средних двух часовых значений Sq вблизи их суточных экстремумов. С целью наглядности сезонных вариаций были построены диаграммы распределения месячных амплитуд SqZ, SqY вариаций и соответствующих индексов солнечной активности F10,7 в течение 1958–1991 гг. На средних широтах амплитуда Sq вариации каждой компоненты поля используется для обнаружения долговременных трендов Sq вариаций и источников их сезонных возмущений.

При изучении временных изменений Sq в связи с солнечной активностью (СА) использовались часовые индексы потока радиоизлучения на частоте 10.7 см (F10.7), представленные на международных сайтах <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR.DATA/>.

В ходе исследований был проведен статистический анализ, определены коэффициенты корреляции между рядами амплитуд Sq и индексов F10.7 для каждого месяца. Вычислены коэффициенты (a, b, a/b, n) регрессионных уравнений  $y = b x^n + a$ , где  $y$  – амплитуда солнечно-суточных вариаций Z, Y компонент измеряемого на обсерватории AIA магнитного поля, x – соответствующие индексы солнечной активности для различных сезонов и фаз солнечного цикла при  $F10,7 < 100$  и  $F10,7 > 100$  в течение 1958–1991 гг.

### 3. Результаты анализа сезонных, годовых и циклических изменений Sq геомагнитных вариаций на прибрежной обсерватории AIA

Солнечно-суточные (Sq) вариации геомагнитного поля, усредненные по 5 магнитно-спокойным дням месяца, показаны на рис. 1, где можно видеть значительные различия формы суточного хода вертикальной и восточной компонент магнитного поля в зависимости от сезона и уровня солнечной активности. Обратим внимание на фазовые сдвиги в суточном ходе Sq от минимума к максимуму СА, смещение (~ 1 ч к утру) времени суточных экстремумов SqY при любой фазе СА от зимы к лету и на появление коротких гармоник в суточном ходе Sq, особенно в зимний сезон, источники которых требуют идентификации в будущем.

Максимальные значения суточной амплитуды Sq вариаций вертикальной компоненты составляют летом 32–46 нТл, а минимальные (16–22 нТл) – соответственно в годы максимума и минимума СА. Для восточной компоненты амплитуды меньше соответственно

в 3,5 и 2,5 раза летом, но зимой наблюдаются почти равные 2 нТл низкие значения амплитуд при СА F10.7 < 100. Величина годовых (лето-зима) колебаний амплитуд SqZ в течение трех циклов наибольшая в максимуме СА 28–31 нТл по сравнению с 14–24 нТл в минимуме СА. Годовые колебания амплитуд SqY восточной составляющей поля значительно слабее соответственно 5–9 нТл и 2–7 нТл.

Проведенный анализ показал, что циклические изменения пиковых значений Sq меньше годовых колебаний и различаются для вертикальной и восточной компонент в зависимости от сезона. Летом в 3 раза, а зимой всего в 1,5–2 раза превалируют значения в максимуме СА, тогда как восточная компонента, напротив, слабо изменяется в цикле (1,5 раза) зимой. Наблюдаемые искажения картины суточного хода SqZ зимой вызваны, по-видимому, наложением короткопериодных (12, 8, 6, 4 часа) гармоник разной интенсивности вследствие появления других источников, не связанных с динамо-природой Sq токовой системы [Stening, 2008, Tortora et al., 2010]. При использовании суточных амплитуд Sq вариаций Y, Z компонент магнитного поля, интенсивности которых определяются разными UT, можно контролировать различные эффекты явлений СА и связанные с наклоном диполя, которые имеют зависимость от UT [Takeda, 2013].

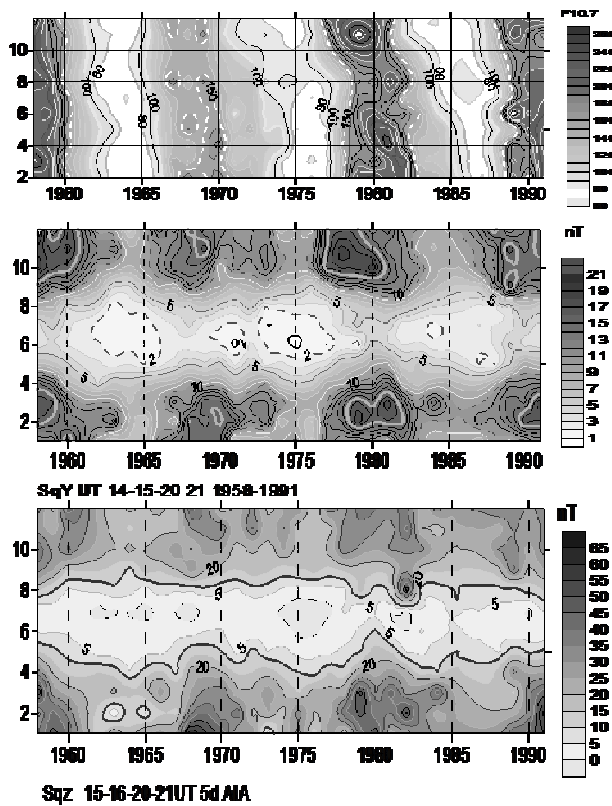


Рис. 2. Диаграммы временных изменений месячных характеристик Sq и СА в течение 1958–1991 гг. на обсерватории АИА: амплитуд вариаций SqZ – вертикальной (внизу) и SqY – восточной компонент магнитного поля (центр) и соответствующих индексов СА F10.7 (вверху).

Проведенное ранее [Максименко и др., 2013] сопоставление временных рядов характеристик солнечной активности (F10.7) и суточных амплитуд солнечно-суточных геомагнитных вариаций Sq вариаций (их горизонтальной и вертикальной компонент) показало их высокое подобие на АИА летом в интервале 1958–2010 гг. На рис. 2 приведены диаграммы годовых изменений месячных значений индексов F10.7 (вверху) и соответствующих амплитуд Sq(Y) (центр), Sq(Z) (внизу) вариаций горизонтальной и вертикальной компонент магнитного поля, измеренного на обс. «Аргентинские острова»

(AIA) в течение 1958–1991 гг. Согласно диаграммам, наиболее четкие сезонные колебания амплитуд Sq с уменьшением их значений (до отрицательных) в зимние месяцы проявились для SqY вариаций. Однако вблизи максимумов СА, особенно 1958, 1981 и 1991 гг., когда  $F10.7 > 200$ , область появления амплитуд SqY менее 5 нТл сократилась до одного месяца (июня). Для амплитуд SqZ вариаций вертикальной компоненты поля, которые имели более широкий диапазон изменений, протяженная область нулевых и отрицательных значений амплитуд была замечена в июле, около глубоких минимумов СА в 1975 г. В равноденствие ослабляются циклические изменения амплитуд. Для большей наглядности годовых колебаний суточных амплитуд на рис. 3а показаны графики их месячных медианных значений для восточной компоненты поля, а циклические изменения вместе с индексом F10.7 даны на рис. 3б для лета (02) и зимы (07) за период в 33 года. Характер солнечных циклических колебаний среднемесячной суточной амплитуды SqY вариаций в основном повторяет соответствующие изменения солнечного индекса F10.7 вблизи максимума СА в этих месяцах.

Стандартный корреляционный анализ показал достаточно высокий коэффициент корреляции  $r(SqY; F10.) \sim (0.65 - 0.92)$  между F10.7 и суточными амплитудами SqZ, SqY вариаций вертикальной и восточной компонент поля при небольших изменениях в отдельные месяцы (рис. 3а) в течение 1958–1991 гг.

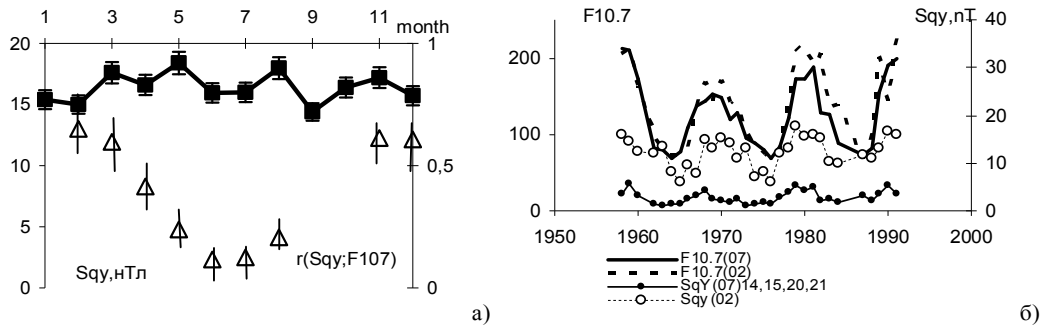


Рис. 3 а, б. Годовые изменения медианных (со стандартными отклонениями) значений суточных амплитуд SqY вариаций, коэффициентов корреляции  $r(SqY; F10.7)$  между амплитудами SqY вариаций и соответствующими индексами F10.7 (а), и циклические изменения SqY, F10.7 летом (02) и зимой (07) (б) в 1958–1991 гг.

Далее рассмотрим результаты изучения зависимости суточных амплитуд Sq вариаций восточной компоненты от индекса СА с помощью регрессионного анализа. На рис. 4 приведены графики зависимости месячных значений суточных амплитуд SqY вариаций от F10.7 на разных фазах солнечного цикла по данным 2-8, 11-12 месяцев с указанием уравнения линии регрессии. Следует отметить большую величину наклона ( $a = 0,052$ ) линии регрессии на фазе роста (обозначение маркером “>”), чем  $a = 0,034$  на фазе спада СА (маркер “<”) в солнечных циклах. При этом практически линейная зависимость  $SqY = 0,058 (F10.7)^n$ , ( $n=0,98$ ) была отмечена на стадии роста СА, по сравнению с  $n=0,64$  на спаде СА, когда ожидается усиление магнитной активности, имеющее двухлетнее запаздывание относительно максимума СА [Torra et al., 2010]. Аналогичные графики для уровней повышенной ( $F10.7 > 100$ ) и пониженной ( $F10.7 < 100$ ) СА с соответствующими уравнениями регрессии даны на рис. 4 (справа). Анализ показал, что отсутствует корреляция между SqY и F10.7 при низкой СА (коэффициентах корреляции  $r(Sq; F10.7 <) = -0,17$ ), а при повышенной активности Солнца коэффициент корреляции достигает  $r=0,37$ . В последнем случае величина наклона линии связи Sqy и F10.7 равняется  $a=0,047$ , что ближе к наклону ‘а’ на фазе роста солнечного цикла.

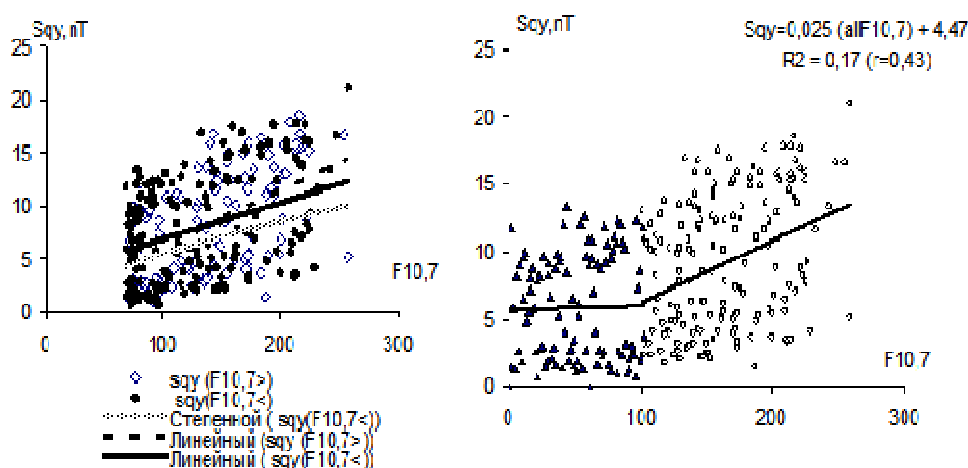


Рис. 4. Графики зависимости месячных значений суточной амплитуды SqY вариаций от индексов F10.7 на AIA в 1958–1991 гг.: на фазе роста (F10.7 >) и спада (F10.7 <) СА в солнечных циклах (слева) и при высокой (F10.7 > 100) и низкой (F10.7 < 100) СА (справа).

Вместе с тем для всего выбранного массива суточных данных корреляция между SqY и СА составила  $r=0,42$  с уравнением линейной регрессии  $SqY=0,025(F10.7)+4,5$ ; ( $R^2=0,17$ ). При этом для низкой СА ( $F10.7 \leq 100$ ) наклон линии связи в 12 раз меньше  $SqY = 0,0028F10.7+5,8$ , чем  $SqY = 0,047F10.7 + 1,5$  при  $F10.7 > 100$ . Ввиду большого разброса значений амплитуд Sq от годовой линии регрессии для низких  $F < 100$  (35% случаев) были сопоставлены уравнения аналогичных линий зависимостей для отдельных сезонов лета и зимы (02 и 07). В результате подтвердилась тенденция к годовым колебаниям Sq: увеличение величин наклона (коэффициент 'a') линии связи SqY с F107 летом (02,11,12), когда  $SqY(02)=0,12(F < 100) - 0,27$ ; ( $R^2=0,16$ ) и  $SqY(11-12)=0,11(F < 100) + 0,8$ ; ( $R^2=0,29$ ) при сравнительно невысокой её оправдываемости ( $R^2$ ) из-за малых значений амплитуд в течение 33-х лет при низкой солнечной активности.

С другой стороны, некоторые сезонные изменения были обнаружены из данных показателей степенной зависимости суточных амплитуд Sq вариаций Z и Y компонент магнитного поля от индекса F10.7 в том же интервале 1958–1991 гг. Так, для восточной компоненты SqY зависимость от F10,7 с показателем степени  $n = 0,5-0,7$  была отмечена в основном летом, что вызвано определяющим влиянием величины электрической проводимости ионосферы, которая пропорциональна электронной концентрации в максимуме нижнего (100 км) ионосферного слоя E. Последняя имеет степенную ( $n=1/2$ ) зависимость от индекса F10.7. Показатель степенной связи увеличивается до  $n=0,98$  зимой, так же как и на стадии роста СА, когда, очевидно, преобладают или накладываются другие источники Sq (атмосферные волны, например, от внезапных потеплений или внешние - продольные магнитосферные токи). Таким образом, можно полагать, что за SqY вариации восточной компоненты ответственна величина электрической проводимости, кроме зимнего периода на AIA, где наблюдается сложная ситуация из-за низких значений амплитуд SqY.

Далее по данным суточных амплитуд Sq вариаций вертикальной и восточной компонент поля был проведен детальный анализ годовых изменений коэффициентов 'a', 'b', 'a/b' уравнений линейной регрессии  $Sq = b + a (F10.7)$  между месячными значениями амплитуд и индексов F10,7 для каждого месяца года в интервале 1958–1991 гг. На рис. 5 приведены графики изменений коэффициентов, полученных в течение года, где хорошо видны годовые колебания коэффициента 'b' с минимумом зимой и максимумом летом, которые характеризуют изменения минимальных значений суточных амплитуд Sq при низ-

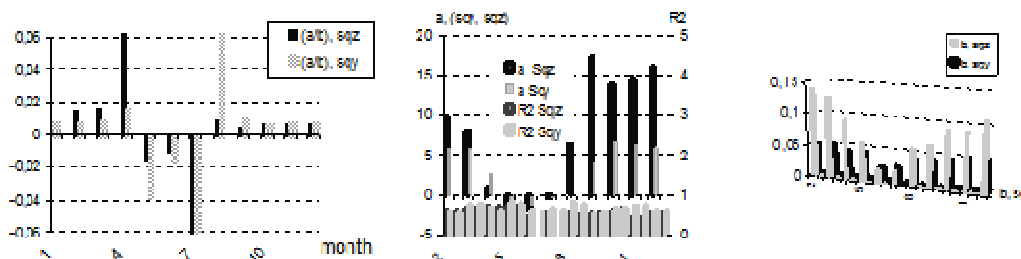


Рис. 5. Годовые изменения коэффициентов линейной регрессии  $Sq = a F107 + b$ ; ( $R^2$ ) между суточной амплитудой  $SqY$ ,  $SqZ$  и индексом СА ( $F10,7$ ) в течение 1958–1991 гг.: ‘a/b’ (слева), ‘a’ и ‘ $R^2$ ’ (в центре), ‘b’ – (справа).

ких коэффициентах  $F10,7$ . Присутствие годовых гармоник заметно и по величинам наклона ‘a’ линии линейной регрессии, показывающим также максимальные значения в сентябре и октябре соответственно для вертикальной и восточной компонент поля и смену знака на отрицательный зимой. Что касается значений отношений коэффициентов ‘a/b’, то, как и в других районах [Penquerc’h et al., 2011], прослеживаются годовые изменения, в отличие от постоянной величины ‘a/b’, принятой в международной сферической гармонической модели  $CM4$  вычисления  $Sq$  поля (Sabaka et al., 2004).

Сезонные изменения  $Sq$  характеризовались зимними отрицательными и летними положительными значениями отношений коэффициентов (‘a/b’) линейной регрессии между  $SqY$  и  $F10,7$  с выбросами их значений в 07, 08 и 04, 07 месяцы соответственно для восточной и вертикальной компонент поля (см. рис. 5). Подтверждение сезонных колебаний также вытекает из данных коэффициентов ‘b’, характеризующих исходные минимальные значения  $F10,7$  и  $SqY$ , полученные из линейных регрессионных зависимостей  $SqY = a F107 + b$  и  $F107 = a1 SqY + b1$  для каждого месяца года. При этом малым отрицательным  $F10,7 = b1$  соответствуют слабые положительные  $SqY = b$  в летний месяц, а их обратная зависимость наблюдается зимою, что и формирует годовую гармонику. Таким образом, фактически временные изменения коэффициентов ‘a’, ‘b’, ‘a/b’ линейной регрессии между амплитудой  $SqZ$  вариаций и  $F10,7$  для каждого месяца подтверждают существование годовых колебаний, однако не позволяют четко выделить полугодовую гармонику за период 1958–1991 гг.

Расширение объема исходных данных, проведение подобного анализа с использованием гармоник  $Sq$  вариаций [Stening, 2008] и учета степенных показателей их связи с СА и ионосферной проводимостью для всех компонент магнитного поля, по-видимому, ускорит выявление причин годовых, полугодовых и сезонных изменений  $Sq$  [Takeda, 2013]. При этом совместное использование спектрального, гармонического, нелинейного регрессионного анализов  $Sq$  поля весьма эффективно. Поскольку  $Sq$  вариации зимою и летом могут использоваться в качестве уровня отсчета поля вариаций компонент геомагнитного поля, то вопрос изучения их зависимостей от СА так же актуален, как при разделении вариаций от внешних и внутренних источников.

#### 4. Выводы

По данным мониторинга вариаций геомагнитного поля за период в 1958–1991 гг. изучены зависимости  $Sq$  вариаций горизонтальной и вертикальной компонент поля от потока солнечного радиоизлучения, индекса солнечной активности ( $F10,7$ ). На AIA обнаружены сезонные изменения коэффициентов связи амплитуд  $Sq$  вариаций с  $F10,7$ : подтверждаются годовые колебания амплитуды  $SqZ$  с максимумом летом и зимним минимумом из данных наклона линии регрессии ‘a’ и свободного члена ‘b’ в уравнениях регрессии  $Sq = a F10,7 + b$ , но полугодовая равноденственная гармоника четко не

выделяется даже для восточной компоненты. Показаны резкие изменения значений отношения линейных регрессионных коэффициентов 'a/b' в отдельные месяцы с появлением отрицательных значений в зимний период, в отличие от принятого постоянства (a/b) в рамках сферической гармонической модели Sq поля (СМ4).

Определены морфологические особенности характеристик Sq вариаций на АИА в течение 1958–1991 гг. Суточный ход Sq вариаций изменяется по форме со смещением моментов суточных максимумов восточной и вертикальной компонент поля в сторону утра от зимы к лету. Найдено превалирование годовых (лето-зима) колебаний суточной амплитуды SqZ, равных ~ (33) нТл, вдвое больших в годы максимума Солнца, над циклическими (17) нТл в течение 19–22 циклов СА. Для медиан восточной компоненты SqY годовые колебания слабее (10±3 нТл), как и циклические изменения с увеличением амплитуд SqY в максимуме СА.

На фоне достаточно высокой корреляции ( $r > 0.65-0.75-0.92$ ) между амплитудой Sq и F10.7 выделены сезонные различия показателей их регрессионной связи (степени зависимости и наклона прямой линии) на АИА. Преимущественно линейная зависимость ( $n \sim 1$ ) зимой, а степенная ( $n \sim 1/2$ ) летом и на стадии спада в солнечном цикле для восточной компонент магнитного поля могут использоваться при выборе метода минимизации влияния СА для определения истинных трендов амплитуд Sq.

**Авторы благодарны исследователям Национального антарктического научного центра Госинформнауки Украины и магнитной обсерватории «Аргентинские острова» за качественные данные геомагнитных вариаций, представляемые в систему INTERMAGNET, а также команде ученых международного сайта <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR.DATA> за оперативную возможность использования данных о солнечных индексах.**

## Литература

**Максименко О.И., Бахмутов В.Г., Kilifarska N., Шендеровская О.Я.** Трендовые изменения геомагнитного поля на обсерватории «Аргентинские острова»: эффект в Sq-вариациях. УАЖ, 2013, № 12, 62–68.

**Hibberd, F.H.** The geomagnetic Sq variation – Annual, semi-annual and solar cycle variations and ring current effects. // J. Atmos. Terr. Phys. – 1985, 47, P. 341–352.

**Macmillan, S., Droujinina, A.** Long-term trends in geomagnetic daily variation // Earth Planets Space, 2007. – 59. – P. 391–395.

**Penquerc'h, V., Richard Hole.** Modelling the Sq field with satellite data: Towards the Swarm mission. HolmeUniversity of Liverpool NCEO meeting, University of Warwick, 5th-8th September 2011.

**Sabaka T.J., Olsen, N., and M.E. Purucker.** Extending comprehensive models of the Earth's magnetic field, // Geoph. Int. J. 2004, 159, 521–547. doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02421.x.

**Stening R.J.** The shape of the Sq current system.// Ann. Geophys., 2008, V. 26, P. 1767–1775.

**Takeda M., Iyemori T., Saito A.** Relationship between electric field and currents in the ionosphere and geomagnetic Sq field // J. Geophys. Res. – 2003. – V. 108, No A5, 1183, doi:10.1029/2002JA009659.

**Takeda M.** Contribution of wind, conductivity, and geomagnetic main field to the variation in the geomagnetic Sq field // J. Geophys. Res.: Space Physics. – 2013. – V. 118. – No 7. – P. 4516–4522.

**Torta J., Santiago Marsal, Juan J. Curto,** et al. 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. – 2010, V. 62, – P. 297–307.

**Yamazaki Y., Yumoto K., Cardinal M.** et al. An empirical model of the quiet daily geomagnetic field variation // J. Geophys. Res. – 2011, V.116, A10, doi: 10.1029/2011JA016487.

**Yamazaki Y., Richmond A.D., Liu H.,** et al. Sq current system during stratospheric sudden warming events in 2006 and 2009 // J. Geophys. Res. – 2012, V.117, A12313, doi:10.1029/2012JA018111.