

УДК 550.382:385

ТРЕНДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОБСЕРВАТОРИИ “АРГЕНТИНСКИЕ ОСТРОВА”: ЭФФЕКТ В Sq-ВАРИАЦИЯХ

О.И. Максименко¹, В.Г. Бахмутов¹, N. Kilifarska², О.Я. Шендеровская¹

¹ *Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,
Киев 03680, пр. Палладина, 32, oimkv@list.ru*

² *National. Institute of Geophysics, Geodesy & Geography Bulgarian Academy of Sciences,
3, Acad. G. Bonchev, Sofia, 1113, Bulgaria*

Определены долговременные тренды суточных амплитуд геомагнитных Sq-вариаций на обсерватории “Академик Вернадский”, ослабляющиеся к концу интервала 1958–2010 гг. Величины трендов SqH, SqZ-вариаций имеют одинаковое значение – 0,06 нТл/год, но разные знаки, что определило соответственно 8,6% уменьшение и 11,3% увеличение суточных амплитуд Sq-вариаций при ~16% росте ионосферной проводимости за 50 лет исследований. Обнаружены 10% вклад изменений (векового хода) магнитного поля в тренд SqH геомагнитных вариаций летом и отсутствие влияния Ap индекса и аномалий CO₂ на AIA с уменьшением магнитного поля в прошлом столетии.

Трендові зміни геомагнітного поля на обсерваторії "Аргентинські острови": ефект в Sq-варіаціях.

О.И. Максименко, В.Г. Бахмутов, N. Kilifarska, О.Я. Шендеровська

Реферат. Обчислено довгочасні тренди добових амплітуд геомагнітних Sq-варіацій на обсерваторії “Академік Вернадський”, які послаблюються на кінець інтервалу 1958–2010 рр. Величини трендів SqH, SqZ-варіацій мають однакове значення – 0,06 нТл/рік, але різні знаки, що зумовило відповідно 8,6% зменшення і 11,3% збільшення добових амплітуд Sq-варіацій при ~16% рості іоносферної провідності за 50 років досліджень. Виявлено 10% вклад змін (вікового ходу) магнітного поля в тренд SqH геомагнітних варіацій у літній період та відсутність впливу Ap індексу і аномалій CO₂ на AIA із зменшенням магнітного поля в минулому столітті.

Trend changes of the geomagnetic field at the observatory “Argentine Island”: effect in Sq-variations

O.I. Maksimenko, V.G. Bakhmutov, N.A. Kilifarska, O.Ya. Shenderovska

Abstract. Trends of the geomagnetic Sq-variation daily amplitudes on the observatory "Akademic Vernadsky" were obtained with the weakening of the end of the interval 1958 to 2010. The daily Sq-variation amplitudes have trends with the same magnitude of 0.06 nT / year, but different signs for horizontal. SqH and vertical. SqZ components of the geomagnetic variations that are defined by a decrease of 8.6% and 11.3% increase in. The ionospheric conductivity is increasing on ~ 16 % in 50 years. It was found that the secular variations of the magnetic field gives 10% contribution to the trend SqH-geomagnetic variations in the summer, and the effect of Ap index and CO₂ anomalies failed to reveal to obs. AIA with the negative trend of the magnetic field in the last century.

Key words: secular and Sq-geomagnetic variations, ionospheric conductivity, trend

1. Введение

Магнитное поле Земли испытывает вековые вариации с периодами 30, 60, 80 и много более лет и короткопериодные (менее солнечного цикла) вариации, которые могут иметь большие на порядок амплитуды.

Вековые вариации магнитного поля связаны с источниками в земном ядре и характеризуются пространственным распределением интенсивности векового хода магнитного поля с фокусами, дрейфующими на запад. Причиной короткопериодных геомагнитных вариаций являются внешние токовые источники, связанные с солнечной активностью и процессами магнитосферно-ионосферного взаимодействия. Солнечно-суточные регулярные S_q геомагнитные вариации с периодом длительности солнечных суток имеют амплитуды порядка десятков нТл. Они создаются ионосферными токовыми системами, возникающими в результате динамо-эффекта в условиях солнечных приливных течений и термоприливных движений атмосферы. Считается (Takeda, 2013), что долговременные тренды локальных S_q вариаций магнитного поля повторяют характеристики проводимости ионосферы, а различия вариаций динамо-электрических полей приписывают вековым вариациям магнитного поля при равных нейтральных ветрах.

Ранее в (Maksimenko, 2011) было показано, что обсерватория Аргентинские острова (AIA), станция Академик Вернадский, расположена в области отрицательного тренда среднегодовых значений компонент магнитного поля Земли с величинами 17%, 23% соответственно для модельных Z, H компонент за последние 100 лет, и со скоростью падения полного поля $dB/dt = 0,26\%/год$ при ее замедлении к концу интервала 1990–2010 гг.

Поскольку разное влияние магнитного поля на проводимость Педерсена и Холла ионосферы было установлено (Takeda et al., 2003), то в этой связи ожидается, что солнечно-суточные магнитно-спокойные вариации компонент геомагнитного поля S_q , определяемые в основном ионосферной проводимостью, тоже могут испытывать различающийся тренд. Из обзора (Данилов, 2012) основными причинами глобальных трендов параметров в ионосфере являются изменения температур, парниковые газы, концентрация которых увеличивается, термосферная циркуляция, вековые вариации магнитного поля, магнитная активность, уровень которой, напротив, уменьшается к концу интервала и во время затяжного минимума Солнца 2006–2009 гг.

Тренд амплитуд S_q в одной точке, имеющих сезонные особенности (Яременко, 1992, Yamazaki et al., 2011), по-видимому, отражает тренды соответствующих параметров солнечной активности, ионосферной проводимости, скорости термосферных ветров и вековых вариаций магнитного поля Земли. В последней эмпирической модели S_q (Yamazaki et al., 2011), созданной на основе данных магнетометров вдоль меридиана 210E в цикле 1996–2007 гг., тоже выделен контроль солнечной активности общей силы тока системы, но не её фокуса. Отмечены сезонные колебания с четкими полугодовыми и годовыми изменениями силы тока в южном вихре и декабрьское повышение силы тока в лунной токовой системе независимо от уровня солнечной активности.

Исследователи долговременных трендов геомагнитных вариаций (Elias et al., 2010, Cnossen et al., 2012, Macmillan et al., 2007) отмечали связь с солнечной активностью, максимумы амплитуд S_q в 1950 и 1980 гг. на 14-ти обсерваториях и тренд величиной $S_q = 1,3$ нТл/столетие (до 10%) (Macmillan et al., 2007); 5–10% изменения амплитуд S_q после исключения влияния солнечной активности за 42 года (1960–2001) на низких и средних широтах (Elias et al., 2010). При этом было обнаружено преимущественное влияние магнитного поля на положительный тренд с 5,4% увеличением амплитуд $S_q(H)$ на ст. FRD, которая находится в магнитно-сопряженном районе ст. AIA. Оценки вклада 20% роста концентрации CO_2 в электронную концентрацию слоя E ионосферы составляли около 0,5%. По результатам модельных (магнитосфера-ионосфера-термосфера – СМИТ) исследований вклада изменений магнитного поля на тренды в ионосфере, термосфере и S_q -вариации

(Chosen et al., 2012), вековой ход магнитного поля, а именно движения на север магнитного экватора, и западный дрейф магнитного поля являлись доминирующей причиной тренда в ионосфере и в изменениях амплитуд Sq-вариаций величиной (5–10 нТл/столетие) в регионе Атлантики на низких широтах.

В работе приведены результаты изучения тренда Sq-вариаций геомагнитного поля в связи с вековыми вариациями магнитного поля, полученными по данным измерений на обсерватории “Академик Вернадский” (AIA) в интервале 1958–2010 гг., включающем затяжной минимум последнего солнечного цикла.

2. Исходные данные и методы обработки

В работе были использованы данные среднечасовых наблюдений компонент геомагнитного поля на обсерватории AIA за период 1958–2010 гг. и сформированы массивы их суточных изменений для трех компонент магнитного поля по 5 международным магнитно-спокойным дням месяца и их среднемесячных суточных Sq(UT)-вариаций для каждого месяца года в течение всего исследованного диапазона.

На основе среднемесячных Sq-вариаций был проведен анализ морфологических особенностей суточного хода Sq и выявлены моменты экстремумов суточного хода. Для обнаружения долговременных трендов Sq-вариаций была использована количественная характеристика – амплитуда солнечно-суточных Sq-вариаций H, Z компонент магнитного поля. В качестве амплитуды на средних широтах обычно используют разницы средних двух часовых значений Sq вблизи суточных экстремумов (Hmax-Hmin).

В ходе работы были оценены статистические связи между анализируемыми параметрами. Вычислялись величины коэффициентов корреляции между амплитудами солнечно-суточных вариаций Sq(H), Sq(Z) и связанными с ними компонентами тензора интегральной ионосферной проводимости (параллельной проводимости S0, поперечных Педерсена S1 и Холла S2), индексами солнечной F10.7 и магнитной Ap активности, величиной полного магнитного поля F на AIA. Вековые вариации (ВВ) компонент геомагнитного поля на AIA вычислялись по среднегодовым значениям данных наблюдений и модельных (IGRF) расчетов (Maksimenko, 2011) вне зависимости от солнечной активности. Были построены функции кросс-корреляции с временным сдвигом до 15 лет между вековым ходом полного магнитного поля Fsv и изменчивостью Sq вариаций, а также с аномалиями (отклонение от средних значений) концентрации парниковых газов CO₂ в интервале 1958–2010 гг. Одновременно были вычислены величины соответствующих временных трендов средних месячных значений F, Z и H компонент магнитного поля.

Изучение глобальных трендов физических параметров в геофизике требует применения статистических методов линейной и множественной регрессии, корреляционного анализа (Данилов, 2012, Elias et al., 2010, Kilifarska, 2012). Для определения тренда амплитуд Sq-вариаций был использован линейный регрессионный анализ и, в частности, метод остатков. Суть этого метода состоит в исключении изменчивости, связанной с доминирующими вариациями солнечного ультрафиолета (индекс F10.7, характеризующий поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см). Остаточная изменчивость затем анализировалась для выявления длиннопериодических изменений, не связанных с солнечной активностью. Чтобы оценить вклад воздействующих факторов в остаточную изменчивость, сопоставлялись величины трендов остатков Sq-вариаций после последовательного исключения влияния ионосферной проводимости, интенсивности магнитного поля, его наклона, концентрации парниковых газов CO₂ и др., имеющих потенциальный вклад в амплитуду Sq-вариации на широте AIA.

При этом были использованы данные расчетов интегральных профилей ионосферных проводимостей (параллельной проводимости S0, поперечных Педерсена S1 и Холла S2) по модели, представленной на сайте (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ionocond/sigcal/index.html>), созданной на основе моделей ионосферы IRI и нейтральной атмосферы. Модельные

значения проводимости Холла (S2) в полдень подтвердили их положительную связь с солнечной активностью в последнем солнечном цикле. Значения $S2=12,7$ S в годы затяжного минимума солнечной активности в 2007 г. и $S2=12,34$ S в 2009 г. по сравнению с $S2=18,67$ S для максимума цикла в 2001 г. При этом числа солнечных пятен изменялись от $Rn=113,7-113$ в (2000–2002) гг. до их минимума $Rn=1,8$ в 2009 г.

Анализ данных. Сопоставление временных рядов характеристик солнечной активности (F10.7), компонент ионосферной проводимости (S0 – Каулинга, S1 – Педерсена, S2 – Холла), амплитуд Sq-вариаций (их горизонтальной и вертикальной компонент) выявляет их подобие и четкое следование вариациям солнечной активности в интервале 1958–2010 гг. Для примера на рис. 1 приведены кривые изменений значений проводимостей S1, S2 и Sq(H), Sq(Z)-вариаций горизонтальной и вертикальной компонент магнитного поля на обс. “Академик Вернадский” (AIA) (Рис. 1-3 см. на цв. вклейке между 64 и 65 стр.)

После проведения сглаживания по трём точкам для интерполяции отсутствующих данных в некоторых годах и получения непрерывных рядов стало возможным применение не только регрессионного, но и корреляционного анализов. Коэффициенты корреляции между сглаженными значениями F10.7 и Sq, а также между S1, S2 и Sq, сведены в таблицу. Там же даны соответствующие значения R^2 , характеризующие степень вклада ионосферы (через ионосферную проводимость) или солнечной активности (F10.7) в изменчивость суточной амплитуды (Sq) солнечно-суточных геомагнитных вариаций.

Таблица

Коэффициенты корреляции (и их квадраты R^2) между изменениями среднемесячных значений суточных амплитуд Sq(H) и Sq(Z) геомагнитных вариаций и индексов F10.7, проводимостей S1 и S2 на AIA в течение 1958-2010 гг.

Параметр	F10.7	S1	S2
SqZ	0.792; $R^2=0.63$	0.867; $R^2=0.75$	0.826; $R^2=0.68$
SqH	0.79; $R^2=0.62$	0.746; $R^2=0.56$	0.695; $R^2=0.48$

Постольку основные изменения амплитуд Sq-вариаций определяются изменениями солнечной активности (коэффициенты корреляции довольно большие), то вклад других факторов во временные изменения Sq-вариаций (в частности, в их тренд) можно оценить после исключения влияния фактора с наибольшим вкладом. Как следует из таблицы, для SqH превалирует вклад от солнечного радиоизлучения F10.7, а для SqZ – вклад ионосферы (через ионосферные проводимости S1, S2). Для описания зависимости Sq от F10.7, S1 или S2 мы построили регрессионную модель с одним независимым параметром типа $Y=a+bX$, где a – свободный член, b – коэффициент регрессии, X – независимая переменная (в нашем случае F10.7, S1 или S2), а Y – Sq-вариации магнитного поля. После вычитания модельных значений амплитуд Sq из реально измеренных получаем остаточную изменчивость амплитуд, которая, скорее всего, не связана с солнечной активностью.

Полученные остатки изменчивости можно проанализировать подобным образом, чтобы отыскать другой следующий фактор, влияющий на изменения интенсивности Sq-вариации.

3. Обсуждение результатов и выводы

Определение трендов. В связи с вышеизложенным, преимущественные факторы влияния на Sq-вариации для горизонтальной и вертикальной компонент магнитного поля на AIA не совпали. Поэтому для определения трендов изменений суточных амплитуд Sq геомагнитных вариаций были использованы два способа, оба с применением статистического метода остатков.

В первом случае тренды SqH, SqZ были построены на основе данных остатков Sq, полученных после вычитания из реальных Sq значений модельной зависимости, линейной регрессии Sq от F10.7. Результаты приведены на рис. 2.

Во втором случае основой для построения трендов Sq являются данные остатков Sq, аналогично полученных после вычитания из реальных Sq значений линейной регрессии Sq от интегральной ионосферной проводимости Педерсена S1 и проводимости Холла S2. Кривые изменений остатков SqH, SqZ с соответствующими линиями их трендов показаны на рис. 3 а, б.

На рис. 2 видно, что тренды, определенные на основе остатков регрессионной модели Sq от F10.7, составляют 0,166 нТл/год для SqZ и -0,062 нТл/год для SqH.

Тренды, определенные на основе данных остатков модельной линейной регрессии Sq от ионосферной проводимости (S1 и S2) (рис. 3а, б), составляют соответственно: 0,064 нТл/год для SqZ и -0,182 нТл/год для SqH. При этом отметим увеличение величин трендов при сокращении интервала до 1991 г.

В связи с полученными различиями трендов возникает вопрос: какому из определенных трендов остатков отдать предпочтение? Возвращаясь к таблице, можно видеть, что большая (68%–75%) часть варибельности SqZ определяется ионосферной проводимостью. Поэтому вычисленный тренд на основе данных остатков регрессионной линейной модели Sq от ионосферной проводимости кажется более достоверным, т.е. 0,064 нТл/год, или увеличение амплитуд SqZ на 11,3%. Что касается вариаций SqH, они лучше описываются вариациями солнечного ультрафиолета (F10.7): 62% по сравнению с (48–56%) от ионосферной проводимости. Поэтому более убедительным кажется тренд, вычисленный по данным остатков модели линейной регрессии SqH от F10.7, т.е. -0,062 нТл/год, или 8,6% уменьшение амплитуд SqH.

Таким образом, в конечном счёте можно заключить, что на ст. Академик Вернадский за прошедшие 50 лет горизонтальная компонента Sq вариации геомагнитного поля уменьшилась на 8,6% со скоростью 0,06 нТл/год, а их вертикальная компонента увеличилась на 11% со скоростью 0,06 нТл/год

Исходя из природы генерации Sq вариаций, которые вызываются солнечной токовой системой на уровне ~100 км в ионосфере, возникающей при электро-динамо-эффектах в условиях тепловых и приливных движений в атмосфере, они зависят от интегральной ионосферной проводимости, определяемой в свою очередь электронной концентрацией и магнитным полем. Возникает вопрос: какой фактор может быть ответствен за полученные тренды Sq вариаций? В попытке получить ответ мы проанализировали связанность между вариациями геомагнитного поля (т.е. вековой ход полного магнитного поля (svF)) и сглаженными по трём точкам Sq вариациями, а также и с соответствующими их остатками после исключения влияния солнечной активности. На рис. 4. показаны графики функций кросс-корреляции соответственно между (svF) и солнечно-суточными геомагнитными вариациями вертикальной компоненты (SqZ) (слева), между (svF) и SqH-вариацией горизонтальной компоненты (в центре) и для остатков SqH после исключения линейной зависимости от солнечной активности (справа). В результате можно полагать, что SqZ вариации являются независимыми от векового хода полного геомагнитного поля (svF) (см. рис. 4, слева). Обратим внимание, что статистически значимая корреляция в нижней половине графика отражает влияния SqZ вариации на вековые вариации магнитного поля. Наоборот, SqZ вариации имеют некоторый вклад в вариации svF при различии в характере векового хода вертикальной и горизонтальной компонент поля на AIA и двухгодичном сдвиге между максимумами магнитной и солнечной активности.

В то же время изменения SqH-вариаций горизонтальной компоненты магнитного поля, в частности, по-видимому, ее отрицательный тренд, можно связать с влиянием векового хода магнитного поля svF (рис. 4, центр, справа). Согласно представленным последним графикам на рис. 4, около 10% (посчитанных по формуле: $R^2=0.31^2 \cdot 100$) от изменений горизонтальной Sq-вариации можно причислить к влиянию векового хода геомагнитного поля.

Из других факторов, которые могут иметь некоторое воздействие на Sq, был рассмотрен Ар индекс, и выяснилось, что он не коррелирует с остатками SqH и SqZ. Что касается

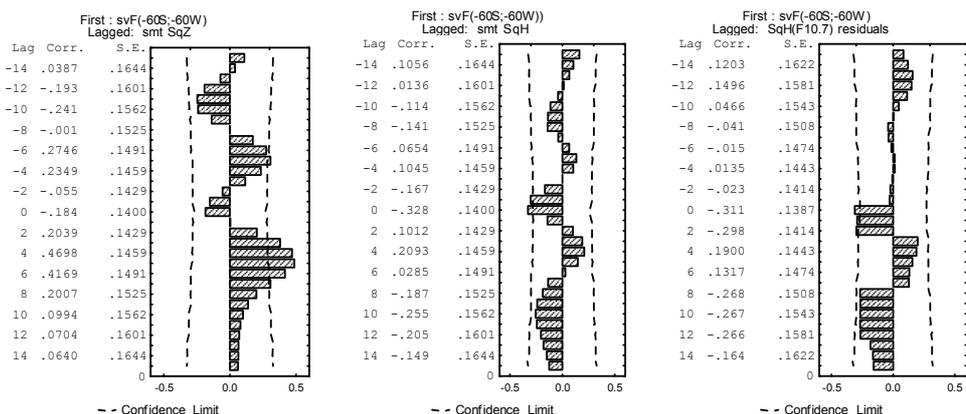


Рис. 4. Графики функции кросс-корреляций со сдвигом по времени между вековым ходом магнитного поля svF и изменениями амплитуд SqZ-вариаций (слева), SqH-вариаций (в центре) и остатками SqH после вычитания модельной линейной зависимости от F10.7 (справа) на AIA в интервале 1958–2010 гг. (использован пакет программ STATISTIKA).

возможного влияния монотонного увеличения концентрации углекислого газа CO₂ за последние пятьдесят лет, то оказалось, что и среднемесячные значения CO₂, и их аномальные значения (т.е. отклонения измерений от их средних значений) коррелируют с остатками SqZ, но не коррелируют с SqH. Корреляция с вертикальной компонентой Sq вариаций, по-видимому, связана с нарастающим трендом у каждой из них. Отсутствие связанности с горизонтальной компонентой – SqH указывает на то, что увеличение концентрации углекислого газа вряд ли имеет какой-нибудь вклад в длиннопериодические изменения Sq вариации геомагнитного поля.

Проведенный анализ трендов остатков SqZ и аномальных значений CO₂ (dCO₂) показывает, что они довольно сильно различаются (рис. 5 а). К тому же вычисленные корреляционные коэффициенты со сдвигом во времени показывают, что причиной некоторой когерентности в их вариабельности является SqZ, а не CO₂ (рис. 5 б).

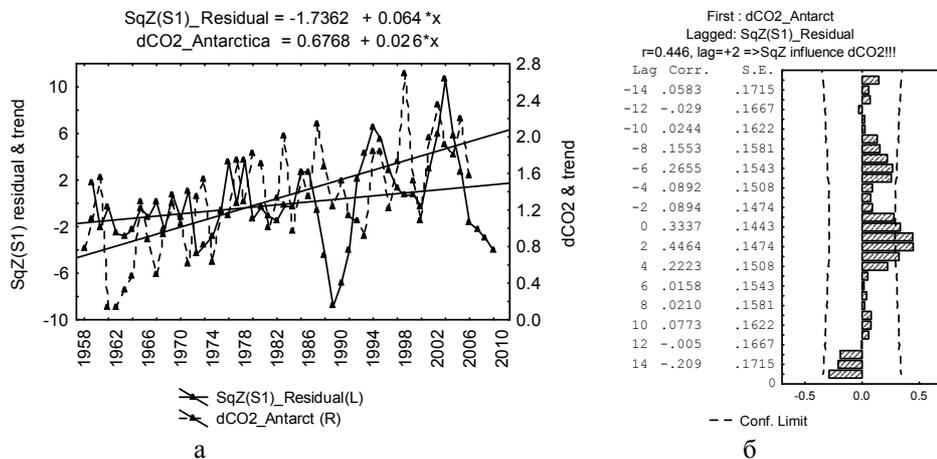


Рис. 5: а – временные изменения остатков изменчивости вертикальной компоненты геомагнитных вариаций после исключения влияния проводимости Педерсена – SqZ(S1) и аномальных значений концентрации углекислого газа – dCO₂ в течение 1958–2010 гг.; б – распределение кросс-корреляционных коэффициентов со сдвигом по времени между SqZ(S1) и dCO₂ при смещениях от -15 до +15 лет на широте AIA.

Все это позволяет сделать вывод, что остаточная изменчивость Sq вариации магнитного поля (после исключения влияния солнечной радиации) не была связана ни с влиянием магнитной активности (Ap индекс), ни с изменениями концентрации углекислого газа.

Приведенные результаты относятся к летнему периоду года, а заметные сезонные эффекты трендов солнечно-суточных геомагнитных SqH, SqZ вариаций остались за рамками статьи.

4. Выводы

Определены тренды SqH, SqZ солнечно-суточных вариаций горизонтальной и вертикальной компонент геомагнитного поля на базе данных измерений в магнитно-спокойные дни на обсерватории “Академик Вернадский” при использовании статистического метода остатков линейной регрессии в интервале 1958–2010 гг.

Величина трендов SqH, SqZ-вариаций после исключения влияния солнечной активности (F10.7) имеет примерно одинаковую величину 0,06 нТл/год, но противоположные знаки, что определяет соответственно 9% уменьшение и 11% увеличение их суточных амплитуд за 50 лет исследований. Анализ возможных источников трендовых изменений Sq показал, что на высокоширотной обсерватории AIA вековые изменения магнитного поля в летний период составляют примерно 10% вклад в тренд SqH геомагнитных вариаций с уменьшением магнитного поля в прошлом столетии, тогда как оценки вклада других агентов (индекса Ap геомагнитной активности и аномалий концентрации углекислого газа) положительных результатов для интервала 1958–2008 гг. пока не дали.

Авторы благодарны исследователям Национального антарктического научного центра Госинформнауки Украины и обсерватории “Академик Вернадский” за качественные данные геомагнитных вариаций, представляемые в систему INTERMAGNET, а также команде сайта исследователей (см. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ionocond/sigcal/index.html>) за возможность использования их моделей. Работа выполнена в рамках проекта EUFP7 2011 “BlackSeaHazNet”

Литература

Данилов А. Долговременные тренды в верхней атмосфере (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. – 2012. – Т. 52. №3. – С. 291–312.

Яременко Л.Н. Солнечные суточные вариации геомагнитного поля // Наукова Думка. Киев. – 1992. – С. 140.

Cnosse I., Richmond A. 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. – 2012. – doi:10.1029/2012JA018447.

Elias Ana G., Marta Zossi de Artigas, Blas F. de Haro Barbas. Trends in the solar quiet geomagnetic field variation linked to the Earth's magnetic field secular variation and increasing concentrations of greenhouse gas // J. Geophys. Res. – 2010. – V. 115, No. A8, doi: 10.1029/2009JA015136.

Kilifarska N. Climate variability – a concert for O₂, H₂O vapour and “orchestra” // Тр. Семинара НАНУ и Фонда фундаментальных исследований России “Проблемы и достижения долгосрочного метеорологического прогнозирования”. – 5-7 октября 2011. Киев. Ника-центр. – 2012. – С.167–179.

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

Maksimenko O.I. Some properties of angient changes of total geomagnetic field at the observatory “Academic Vernadsky” // Theses of 5-th UAN Conf./Kiev. – 2011. – P. 157.

Takeda M., Iyemori T., Saito A. Relationship between electric field and currents in the ionosphere and the 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.

Yamazaki Y., Yumoto K., Cardinal M. et al. An empirical. model of the quiet daily geomagnetic field variation // 2012. – doi: 10.1029/2011JA016487.