

УДК 523.9

Н. И. Пишкало, У. М. Лейко

Астрономическая обсерватория Киевского национального университета
имени Тараса Шевченко,
ул. Обсерваторная, 3, г. Киев-53, 04053
pish@observ.univ.kiev.ua

Динамика околополярного магнитного поля Солнца в максимуме 24-го цикла

Проанализированы данные о величине и знаке околополярного магнитного поля Солнца вблизи максимума 24-го цикла солнечной активности по наблюдениям на Солнечной обсерватории имени Вилкокса и по синоптическим картам магнитного поля проекта SOLIS и гелиосейсмического магнитометра НМИ. Исследована динамика суммарных магнитных полей в разных по протяженности приполярных широтных зонах в северном и южном полушариях. Определены эпохи смены знака полярного магнитного поля. Получено, что в 24-м цикле в северном полушарии произошло трехкратное изменение полярности магнитного поля, в южном — однократное. «Переполюсовка» полярного магнитного поля в северном полушарии закончилась примерно на год раньше, чем в южном. Полученные результаты сравниваются с данными о смене знака полярного магнитного поля Солнца в предыдущих солнечных циклах.

ДИНАМІКА БІЛЯПОЛЯРНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ СОНЦЯ У МАКСИМУМІ 24-ГО ЦИКЛУ, Пішкало М. І., Лейко У. М. — Проаналізовано дані щодо величини та знака біляполярного магнітного поля Сонця поблизу максимуму 24-го циклу сонячної активності за спостереженнями Сонячної обсерваторії імені Вілкокса та за синоптичними картами магнітного поля проекту SOLIS і геліосейсмічного магнітометра НМІ. Досліджено динаміку сумарних магнітних полів у різних за протяжністю приполярних широтних зонах у північній і південній півкулях. Визначено епохи зміни знаку полярного магнітного поля. Виявлено, що у 24-му циклі у північній півкулі відбулася потрійна зміна полярності магнітного поля, а у південній — однократна. «Переполюсування» полярного магнітного поля у північній півсфері закінчилося приблизно на рік раніше, ніж у південній. Отримані результати

тати порівнюються із даними про зміну знака полярного поля Сонця у попередніх сонячних циклах.

DYNAMICS OF NEAR-POLAR MAGNETIC FIELD OF THE SUN AT THE MAXIMUM OF SOLAR CYCLE 24, by Pishkalo M. I., Leiko U. M. — Data on the magnitude and the sign of the near-polar magnetic field of the Sun near maximum of solar cycle 24 were analyzed. Polar field observations from the Wilcox Solar Observatory and synoptic magnetic maps from the project SOLIS and the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) were used. We investigated dynamics of total magnetic field at near-polar zones of different size on latitude in north and south hemispheres. We found the epochs of the polar magnetic field reversals. There were triple polar magnetic field reversal in the northern hemisphere and single reversal in the southern hemisphere. The magnetic field reversal in northern hemisphere was finished an year earlier than in the southern one. The results were also compared with data on polar magnetic field reversals in previous solar cycles.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, полярные магнитные поля Солнца имеют максимальные значения в минимуме солнечной активности и минимальные — в максимуме активности. Кроме того, в максимуме активности происходит изменение направления полярного магнитного поля (т. н. переполюсовка глобального дипольного магнитного поля Солнца) [2, 12]. В минимуме солнечной активности напряженность магнитного поля на полюсе и на гелиошироте 55° составляет около 1.15 и 0.2 мТл соответственно [16].

Изменения знака полярного магнитного поля в северном и южном полушариях происходят, как правило, одновременно, временной промежуток может составлять год-полтора, отражая асимметрию солнечной активности по полушариям [17]. Установлено также, что переполюсовка усредненного высокоширотного магнитного поля происходит примерно на год раньше, чем непосредственно на полюсах [1].

Иногда переполюсовки магнитного поля на полюсах бывают многократными. Согласно исследованиям Макарова и Сиварамана [7, 8] тройные переполюсовки наблюдались в циклах 16, 19 и 20 в северном полушарии, и в циклах 12 и 14 — в южном полушарии. В 21—23-м циклах наблюдались однократные переполюсовки в обоих полушариях, причем в северном полушарии они наблюдались на 6—12 месяцев ранее, чем в южном [1, 4, 7, 14, 20].

В целом эволюция полярного магнитного поля хорошо согласуется с теорией α -динамики типа Беккока — Лейтона [3, 6, 10, 12]. Изменения полярности магнитного поля в фотосфере могут быть описаны моделями процесса поверхностного переноса магнитного потока [15, 18, 19].

24-й солнечный цикл начался после затяжного минимума активности, в котором напряженность полярных магнитных полей была примерно в два раза ниже, чем в предыдущих трех циклах (см. рис. 1). Максимум 24-го цикла по сглаженным числам Вольфа наблюдался в апреле 2014 г., и уже опубликовано несколько работ по исследованию процесса переполюсовки полярного магнитного поля в текущем цикле [5, 9, 11, 13, 15, 17, 18]. В частности, в работе [17] обращается особое внимание на то, что асимметричность процесса переполюсовки отражает асимметрию солнечной активности по полушариям, и указывается на то, что первой переполюсовка, как и ожидалось, произошла в северном полушарии. Сан с коллегами [15] получили, что среднее магнитное поле на широтах $|B| > 60$ изменило свою полярность в северном и южном полушариях соответственно в ноябре 2012 г. и в марте 2014 г. В работе [5] получено, что процесс переполюсовки в северном полушарии закончился к середине 2012 г.

В данной работе мы исследуем изменения суммарного магнитного поля на широтах $|B| > 55$ в различных по протяженности широтных зонах в обоих полушариях Солнца по наземным и космическим наблюдениям с целью изучения процесса переполюсовки магнитного поля в этих широтных зонах.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В работе анализировались наблюдаемые в Солнечной обсерватории имени Вилкокса полярные магнитные поля и синоптические карты фотосферного магнитного поля проекта SOLIS (Synoptic Optical Long-term Investigations of the Sun) и гелиосейсмического магнитометра HMI (Helioseismic and Magnetic Imager).

Полярные магнитные поля Солнца, публикуемые на сайте обсерватории имени Вилкокса с 1976 г. (<http://wso.stanford.edu/Polar.html>) представляют собой некие усредненные высокоширотные или приполярные поля, относящиеся к гелиоширотам $|B| > 55$.

На рис. 1 показано изменение со временем месячных чисел Вольфа, взятых на сайте Бельгийской Королевской обсерватории (<http://sidc.oma.be/html/sunspot.html>), и величины полярного магнитного поля Солнца, начиная с 1976 г. Полярные магнитные поля максимальны вблизи минимумов солнечной активности и минимальны — вблизи максимумов. Изменения полярности полярного магнитного поля происходят в эпоху максимума солнечного цикла. Эти изменения в северном и южном полушариях не совпадают во времени.

Синоптические карты фотосферного магнитного поля проекта SOLIS (http://solis.nso.edu/0/vsm/crmaps/63021_cr2146-2165.html) построены на основе наблюдений Солнца в линии Fe I 630.2 нм при помощи векторного спектромагнитографа VSM, установленного на Вакуумном солнечном телескопе обсерватории Китт-Пик. Нами анали-

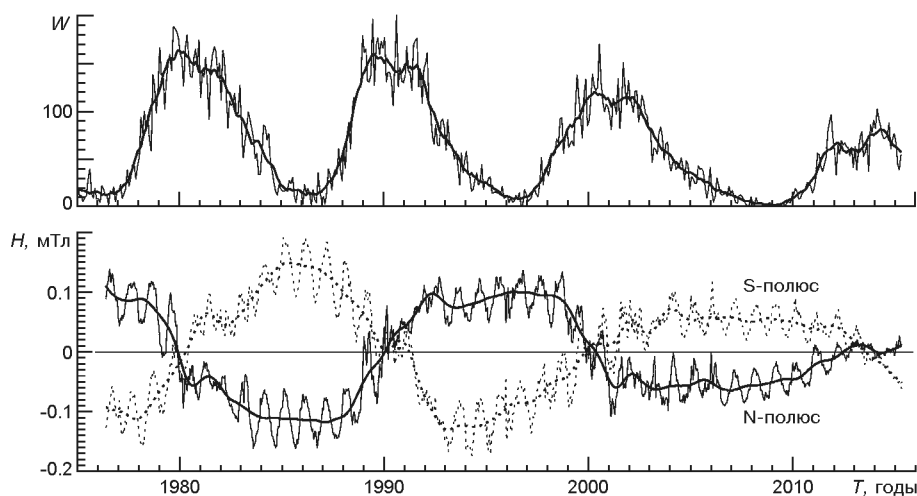


Рис. 1. Изменение со временем чисел Вольфа W (ежемесячные и сглаженные значения — тонкая и жирная линии соответственно, данные <http://sidc.oma.be/html/sunspot.html>) и величины полярного магнитного поля H Солнца, наблюдаемого в Солнечной обсерватории имени Вилкокса (жирные линии — значения H после удаления эффектов геометрической проекции, возникающих из-за наклона плоскости эклиптики к плоскости солнечного экватора)

зировались синоптические карты с низким разрешением (360 пкл по долготе и 180 пкл по широте), соответствующие кэррингтоновским оборотам 2109—2162. Следует отметить, что из-за технических проблем наблюдательные данные для оборотов 2152 и 2155 неполные, а для оборотов 2153 и 2154 они отсутствуют. Поэтому мы не использовали данные для оборотов 2152—2155.

Гелиосейсмический магнитометр HMI (<http://hmi.stanford.edu>) на борту Обсерватории солнечной динамики (Solar Dynamics Observatory, SDO) изучает магнитные поля на всей солнечной поверхности в линии $\lambda = 617.3$ нм с пространственным разрешением 1°. Мы проанализировали синоптические Mg-карты (<http://jsoc.stanford.edu/data/hmi/synoptic>) с пространственным разрешением 720 × 360 пкл для оборотов 2128—2162.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлена динамика солнечной активности по числам Вольфа W и величине высокоширотного магнитного поля H по данным Солнечной обсерватории имени Вилкокса вблизи максимума 24-го цикла в 2012—2014 гг. Максимум 24-го цикла солнечной активности является двухвершинным. Первый, более низкий максимум, соответствует февралю 2012 г. Максимальное сглаженное число Вольфа (81.9) наблюдалось в апреле 2014 г. Значение магнитного поля в зоне от полюса до гелиошироты $B = 55^\circ$ в северном полушарии изме-

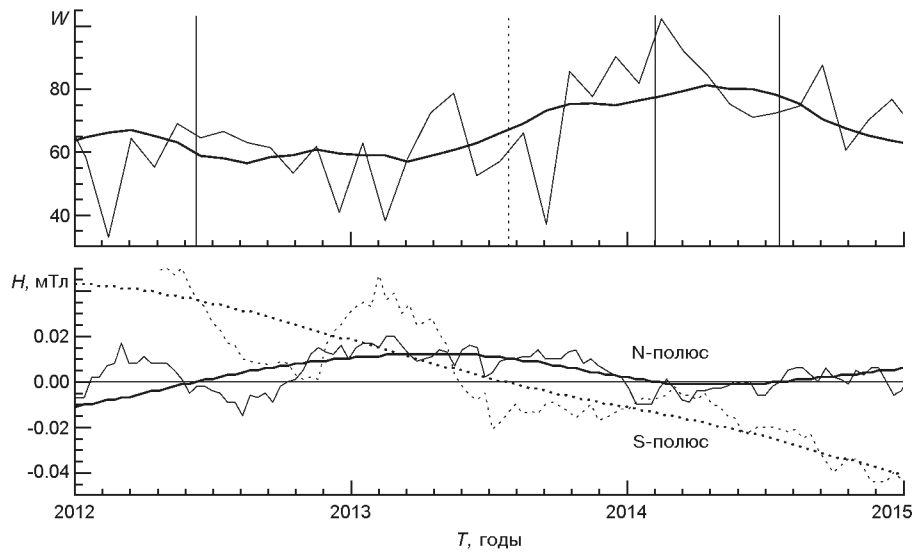


Рис. 2. Значения чисел Вольфа W (ежемесячные и сглаженные) и полярного (высокоширотного) магнитного поля H в 2012—2014 гг. Вертикальные линии — моменты изменения знака полярного магнитного поля: сплошные — на N-полюсе, пунктир — на S-полюсе

нялось немонотонно: суммарное магнитное поле первый раз изменяет знак с « $-$ » на « $+$ » примерно в июне 2012 г., вскоре после первого максимума числа солнечных пятен. Однако в начале 2014 г. суммарное магнитное поле вблизи северного полюса опять становится отрицательным, и окончательно положительное поле устанавливается только в середине 2014 г. Таким образом, в северном полушарии происходит трехкратное изменение полярности высокоширотного магнитного поля. В южном полушарии изменение полярности высокоширотного магнитного поля произошло один раз, в июле 2013 г., причем довольно монотонно, без скачков. На рис. 2 моменты изменений полярности магнитного поля в северном полушарии показаны сплошными вертикальными линиями, в южном полушарии — вертикальной пунктирной линией.

Для более точного определения моментов изменения знака магнитного поля на полюсах Солнца мы также проанализировали синоптические карты фотосферного магнитного поля проекта SOLIS и гелиосейсмического магнитометра HMI. По синоптическим картам отдельно для северного и южного полушарий было проведено суммирование магнитного поля в семи околополярных широтных зонах (шапках), простирающихся от каждого полюса до гелиоширот $|B_{\text{ниж}}| = 55, 60, 65, 70, 75, 80$ и 85 соответственно. Широтная зона с нижней границей $|B_{\text{ниж}}| = 55$ была выбрана для сравнения с наблюдениями полярных магнитных полей на обсерватории имени Вилкокса. Далее были построены зависимости суммарного магнитного потока в каждой широтной зоне от времени и определены моменты времени, когда суммарное магнитное поле изменяло свою полярность.

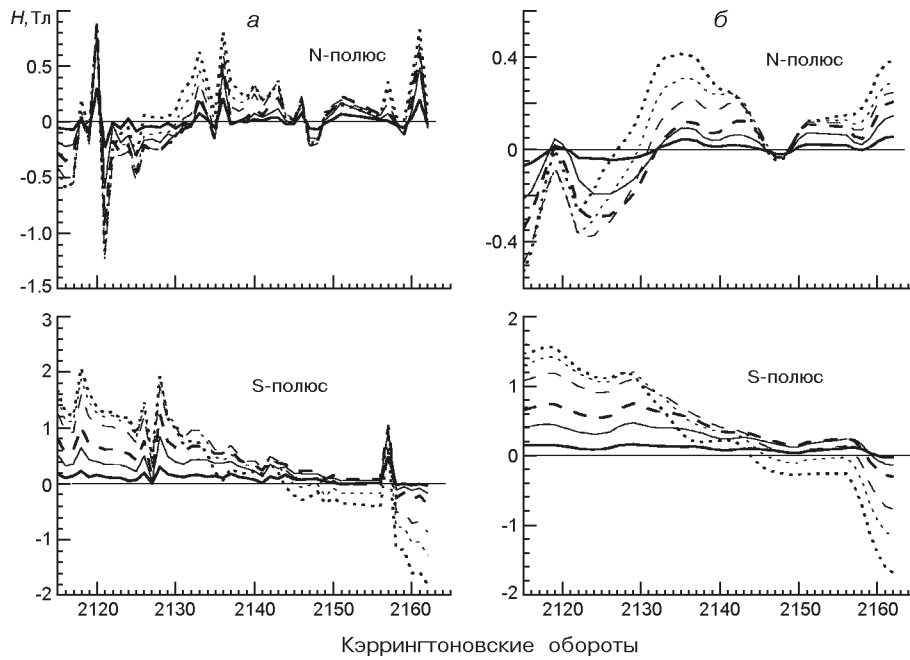


Рис. 3. Изменение со временем суммарного высокоширотного магнитного поля H (проект SOLIS) отдельно в северном и южном полушариях в широтных зонах $|B|$ 55 и $|B|$ 60 (жирная и тонкая пунктирные линии), $|B|$ 65 и $|B|$ 70 (тонкая и жирная штриховые линии), $|B|$ 75 и $|B|$ 80 (тонкая и жирная сплошные линии)

На рис. 3 показаны результирующие кривые для шести широтных зон, полученные из анализа синоптических карт проекта SOLIS, а на рис. 4 — для семи широтных зон по данным магнитометра HMI. Верхние панели на рис. 3 и 4 относятся к северному полушарию, нижние — к южному; слева представлены несглаженные «исходные» данные, справа — после трехкратного сглаживания бегущим усреднением по трем точкам. При расчетах данные, отсутствующие вследствие «невидимости» полюса, заменялись нолями. Из рис. 3 и 4 следует, что изменение суммарного магнитного потока в околополярной зоне южного полушария происходит постепенно, без существенных скачков. Сначала суммарное магнитное поле изменяет свою полярность в более широких зонах и в самом конце — вблизи полюса; между изменениями полярности суммарного поля в зонах $|B|$ 55 и $|B|$ 80 временной интервал составляет примерно полтора года. В южном полушарии процесс реполюсовки полярного магнитного поля заканчивается к 2162-му обороту. В северном полушарии «волнообразный» характер изменения суммарного магнитного потока наблюдается для всех широтных зон: на протяжении кэррингтоновских оборотов 2126—2132 (вторая половина 2012 г.) суммарное поле, начиная с более широких зон, становится положительным, но к обороту 2146 поле опять становится отрицательным и остается таким до оборота 2150. Таким образом, реполюсовка полярного магнитного поля в север-

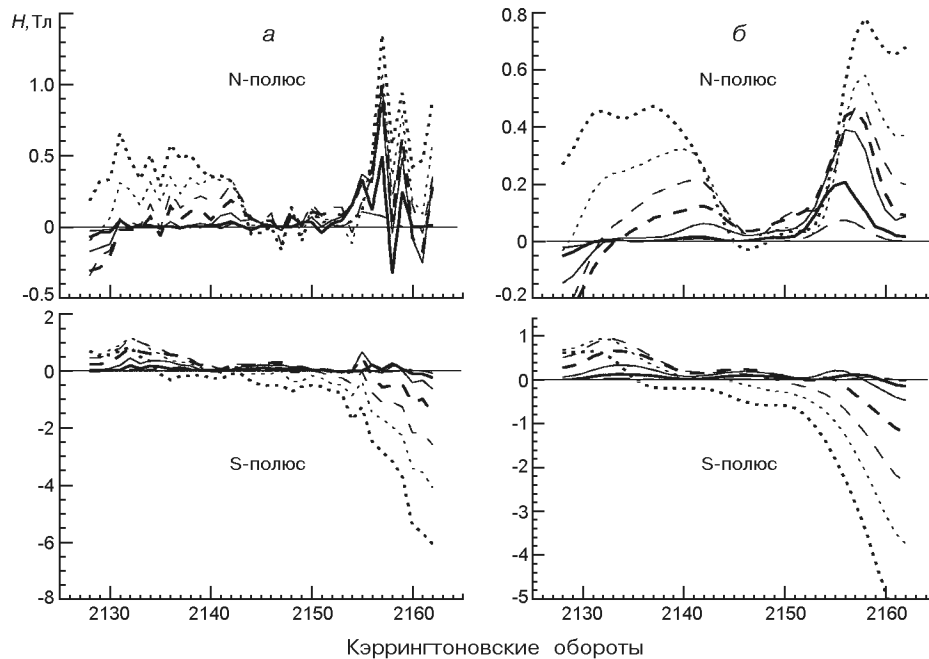


Рис. 4. То же для данных гелиосейсмического магнитометра НМІ. Штрих-пунктир — для широтной зоны $|B| 85$

ном полушарии является трехкратной и заканчивается примерно на год раньше, чем однократное изменение полярности в южном полушарии. Следует обратить внимание, что приблизительно в районе оборотов 2118—2121 в северном полушарии (см. рис. 3) суммарное магнитное поле по некоторым зонам кратковременно дважды изменяет свою полярность. Это позволяет говорить о возможной пятикратной «переполусовке» магнитного поля в северном полушарии.

Следует также отметить, что время изменения полярности суммарного магнитного поля в обоих полушариях (а в некоторых случаях и количество таких изменений в северном полушарии) зависит (\pm один-два оборота) от применяемого типа сглаживания или фильтрации исходных данных. Так, при использовании «широких» фильтров суммарные кривые идут более плавно, и в некоторых широтных зонах в северном полушарии переполусовка остается чисто однократной. Примененное нами скользящее трехкратное усреднение по трем точкам, по нашему мнению, является оптимальным, оно позволяет избежать чрезмерного сглаживания или «зашумления» и определить реальные изменения магнитного поля в околополярных областях.

Данные о номерах оборотов, к началу которых происходят изменения полярности суммарного магнитного поля в исследованных нами высокоширотных зонах, приведены в табл. 1. Заметны некоторые различия по разным инструментам в отдельных широтных зонах, но в целом данные хорошо согласуются между собой.

Таблица 1. Номера кэррингтоновских оборотов, к началу которых закончились процессы изменения знака суммарного магнитного поля для разных широтных зон

Зона, $ B $	SOLIS				HMI SDO			
	N1	N2	N3	S	N1	N2	N3	S
55	2126	2146	2149	2144		2145	2149	2136
60	2127	2147	2148	2146	2129			2144
65	2131	2147	2149	2158	2132			2149
70	2132	2147	2149	2159	2134			2155
75	2132	2146	2150	2160	2133			2158
80	2132	2146	2150	2160	2132			2160
85					2138	2145	2150	2162

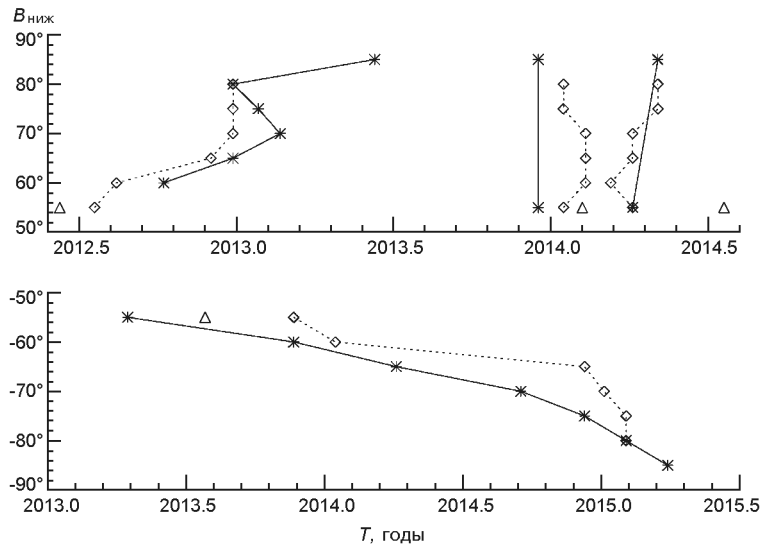


Рис. 5. Моменты переполусовок околополярного магнитного поля в разных широтных зонах северного и южного полушарий. По оси ординат указаны нижние границы $B_{\text{ниж}}$ соответствующих приполярных широтных зон

Рис. 5 иллюстрирует, как процесс изменения полярности высокоширотного магнитного поля Солнца происходит в разных широтных зонах согласно проведенным нами исследованиям. Первая переполусовка в северной полусфере и переполусовка в южной полусфере происходили постепенно, когда процесс изменения полярности перемещался от более низких приполярных широт к более высоким. Эти переполусовки можно назвать своего рода «классическими». Классическая переполусовка в южной полусфере была более медленной, чем в северной, отражая различие скоростей меридиональной циркуляции в разных полусферах. Однако в целом процесс изменения полярности магнитного поля на обоих полюсах занимает примерно два года. Две

кратковременные переполюсовки в северной полусфере в начале 2014 г. были быстротечными и происходили почти одновременно во всей околополярной области.

Наши результаты согласуются с результатами работы [15], в которой по анализу ежедневных магнитограмм с мая 2010 г. по май 2014 г. получено, что в широтных зонах выше $|B| \approx 60$ переполюсовка в северном и южном полушариях заканчивается в ноябре 2012 г. и в марте 2014 г. соответственно.

В работе [13] изучался процесс переполюсовки в 24-м цикле по наблюдениям полярных магнитных полей при помощи оптического солнечного телескопа на борту «Hinode» и сделан вывод, что переполюсовка в северном полушарии должна завершиться к середине 2012 г. В работе [5] по результатам изучения площадей полярных корональных дыр было получено, что переполюсовка в северном полушарии закончилась к середине 2012 г., а в южном — ожидается в 2014 г., примерно через полтора года. В работе [18] прогнозировалось, что переполюсовка глобального дипольного поля закончится к декабрю 2013 г. Согласно данным [9] в северном полушарии переполюсовка закончилась к 2036-му обороту (начало 2013 г.). Кроме того, из анализа связи переполюсовок с эволюцией комплексов активности и корональных дыр в 21—24-м циклах активности был сделан вывод о том, что асимметрия высокоширотных магнитных полей приводит к асинхронности переполюсовок в разных полушариях. О влиянии асимметрии солнечной активности по полушариям на неодновременность переполюсовок полярного поля сказано также в работе [17].

В табл. 2 приведены моменты переполюсовок околополярного магнитного поля Солнца, полученные нами для 24-го цикла в данном исследовании, а также некоторые другие оценки для циклов 21—23. Как видим, во всех указанных циклах первой происходила переполюсовка в северном полушарии.

Таблица 2. Моменты переполюсовок в 21—24-м циклах

Литературный источник	цикл 21		цикл 22		цикл 23		цикл 24	
	N (+/-)	S (-/+)	N (-/+)	S (+/-)	N (+/-)	S (-/+)	N (-/+)	S (+/-)
WSO, $ B \approx 55$	1979.94	1980.31	1990.05	1991.25	2000.38	1999.85	1: 2012.45 2(+/-): 2014.09 3: 2014.58	2013.54
Данная работа							1: 2013.4 2(+/-): 2014.0 3: 2014.4	2015.3
[15] $ B \approx 60$							2012.9	2014.2
[1]	1981.0	1981.6	1990.7	1991.8	2001.2	2001.9		
[4]					2001.4	2001.8		
[7]	1981.0	1981.8						
[14]			1990.9	1992.1				
[20]	1980.9	1981.4						

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований динамики высокоширотного магнитного поля Солнца в максимуме 24-го цикла солнечной активности с использованием данных Солнечной обсерватории имени Вилкокса и синоптических магнитных карт векторного спектромагнитографа VSM обсерватории Китт-Пик (проект SOLIS) и гелиосейсмического магнитометра HMI на борту Обсерватории солнечной динамики установлено, что:

— в северном полушарии произошла трехкратная переполюсовка магнитного поля. Первый раз полярность магнитного поля изменилась с отрицательной на положительную в высокоширотной зоне выше 55° в середине 2012 г. (примерно к обороту 2126) и в приполярной области в начале 2013 г. (примерно к 2138-му обороту). Затем в начале 2014 г. полярность высокоширотного магнитного поля кратковременно и почти одновременно по всем приполярным зонам изменила свой знак обратно на отрицательный, и в середине 2014 г. — снова на положительный. Таким образом, в северном полушарии процесс переполюсовки полностью завершился к середине 2014 г. (к началу 2150-го оборота);

— в южном полушарии произошла однократная переполюсовка; в широтной зоне ниже -55° она закончилась примерно в октябре — ноябре 2013 г. (примерно к 2144-му обороту), а в приполярной области — примерно в апреле — мае 2015 г. (к началу 2162-го оборота);

— переполюсовка в высокоширотных зонах выше $+55^\circ$ (ниже -55°) произошла примерно на год (N-полусфера) или два (S-полусфера) ранее, чем непосредственно в приполярных областях;

— переполюсовка в северном полушарии полностью закончилась примерно на год (9—10 оборотов) ранее, чем в южном;

— в целом процесс переполюсовки полярного магнитного поля на широтах $|B| > 55^\circ$ в обоих полусферах длился около двух лет.

В работе использованы данные проекта SOLIS, функционирующего под эгидой NISP/NSO/AURA/NSF, Обсерватории солнечной динамики и Обсерватории имени Вилкокса Стенфордского университета. Авторы благодарны за возможность использовать эти данные.

1. Пішкало М. І., Бабій В. П., Іванчук В. Г. Північно-південна асиметрія сонячної активності та переполюсовки глобального магнітного поля Сонця у 21-23 циклах активності // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія.—2005.—**41-42**.— С. 98—103.
2. Babcock H. D. The Sun's polar magnetic field // *Astrophys. J.*—1959.—**130**.— P. 364—366.
3. Babcock H. W. The topology of the Sun's magnetic field and the 22-year cycle // *Astrophys. J.*—1961.—**133**.—P. 572—587.
4. Durrant C. J., Wilson P. R. Observations and simulations of the polar field reversals in cycle 23 // *Solar Phys.*—2003.—**214**, N 1.—P. 23—39.

5. *Karna N., Hess Webber S. A., Pesnell W. D.* Using polar coronal hole area measurements to determine the solar polar magnetic field reversal in solar cycle 24 // *Solar Phys.*—2014.—**289**, N 9.—P. 3381—3390.
6. *Leighton R. B.* A magneto-kinematic model of the solar cycle // *Astrophys. J.*—1969.—**156**.—P. 1—26.
7. *Makarov V. I., Sivaraman K. R.* On the epochs of polarity reversals of the polar magnetic field of the Sun during 1870—1982 // *Bull. Astr. Soc. India.*—1986.—**14**.—P. 163—167.
8. *Makarov V. I., Sivaraman K. R.* Evolution of latitude zonal structure of the large-scale magnetic field in solar cycles // *Solar Phys.*—1989.—**119**, N 1.—P. 35—44.
9. *Mordvinov A. V., Yazev S. A.* Reversals of the Sun's polar magnetic fields in relation to activity complexes and coronal holes // *Solar Phys.*—2014.—**289**, N 6.—P. 1971—1981.
10. *Ossendrijver M.* The solar dynamo // *Astron. Astrophys. Rev.*—2003.—**11**, N 4.—P. 287—367.
11. *Petrie G. J. D.* Evolution of active and polar photospheric magnetic fields during the rise of cycle 24 compared to previous cycles // *Solar Phys.*—2012.—**281**, N 2.—P. 577—598.
12. *Petrie G. J. D., Petrovay K., Schatten K.* Solar polar fields and the 22-year activity cycle: observations and models // *Space Sci. Rev.*—2014.—**186**, N 1—4.—P. 325—357.
13. *Shiota D., Tsuneta S., Shimojo M., et al.* Polar field reversal observations with Hinode // *Astrophys. J.*—2012.—**753**, N 2.—Article id. 157.—8 p.
14. *Snodgrass H. B., Kress J. M., Wilson P. R.* Observations of the polar magnetic fields during the polarity reversals of cycle 22 // *Solar Phys.*—2000.—**191**, N 1.—P. 1—19.
15. *Sun X., Hoeksema J. T., Liu Ya., Zhao Ju.* On polar magnetic field reversal and surface flux transport during solar cycle 24 // *Astrophys. J.*—2015.—**798**, N 2.—Article id. 114.—8 p.
16. *Svalgaard L., Duvall T. L., Scherrer P. H.* The strength of the Sun's polar fields // *Solar Phys.*—1978.—**58**.—P. 225—239.
17. *Svalgaard L., Kamide Y.* Asymmetric solar polar field reversals // *Astrophys. J.*—2013.—**763**, N 1.—Article id. 23.—6 p.
18. *Upton L., Hathaway D. H.* Predicting the sun's polar magnetic fields with a surface flux transport model // *Astrophys. J.*—2014.—**780**, N 1.—P. 5—12.
19. *Wang Y.-M., Nash A. G., Sheeley N. R.* Magnetic flux transport on the sun // *Science.*—1989.—**245**.—P. 712—718.
20. *Webb D. F., Davis J. M., McIntosh P. S.* Observations of the reappearance of polar coronal holes and the reversal of the polar magnetic field // *Solar Phys.*—1984.—**92**, N 1.—P. 109—132.

Статья поступила в редакцию 30.07.15