

УДК 523.982+ 523.37

Н. И. Лоцицкая

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ

ВЕКОВЫЕ ВАРИАЦИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН: СОПОСТАВЛЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ИНДЕКСОВ

Виявлено достовірні міжрічні та вікові варіації магнітних полів сонячних плям, які суттєво відрізняються від варіацій чисел Вольфа. Тренди модуля напруженості B_{\max} магнітних полів сонячних плям за спостереженнями 1992–2008 рр. в обсерваторіях Маунт Вілсон та Кітт Пік помітно відрізняються. Аналізуються причини цієї розбіжності. Показано, що індекс V_{sp} менше за інші залежить від повноти програм спостережень, якості інструментів та астроклімату на різних обсерваторіях, тому годиться для глобального моніторингу міжрічних та вікових варіацій сонячних магнітних полів. Дослідження включає дані об'єднаної бази даних магнітних полів сонячних плям Пулковської обсерваторії, архіву даних магнітних полів сонячних плям Кримської астрофізичної обсерваторії та синоптичних програм на 150-футовому сонячному телескопі обсерваторії Маунт Вілсон.

ВВЕДЕНИЕ

Вариации магнитных полей Солнца на длительных интервалах времени представляют интерес для теории солнечной активности, реконструкции модуля напряженности межпланетного магнитного поля, изучения модуляции галактических космических лучей. Более 90 % солнечного магнитного потока сконцентрировано в тонкоструктурных элементах — узлах или жгутах с напряженностью 2000 — 3000 Гс, между которыми поле очень слабое [7]. Активная и невозмущенная область различаются только поверхностной плотностью неразрешимых элементов сильного поля. Вариации магнитного поля пятен и областей вокруг них указывают как на вариации магнитного потока в единичных элементах, так и на изменения поверхностной концентрации неразрешимых трубок.

Для описания межгодовых вариаций магнитных полей Солнца используются магнитометрические и магнитографические индексы. К магнитометрическим относятся среднегодовые значения модуля максимальных напряженностей магнитных полей тени пятен: для пятен всех размеров — H_m , для крупных пятен с диаметром 30–60 сд (секунд дуги) — B_{sp} , для пятен с наибольшим магнитным полем в каждой группе —

B_{\max} . По магнитограммам обсерватории Маунт Вилсон с 1970 г. вычисляются магнитографические индексы $MPSI$ и $MWSI$.

Цель данной работы — выявление закономерностей вековых вариаций солнечных магнитных полей с использованием указанных индексов и выяснение методических источников расхождения результатов разных исследователей.

СРАВНЕНИЕ ВЕКОВЫХ ВАРИАЦИЙ ЧИСЛА ПЯТЕН И ИХ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В 1960-х гг. в работах Рингнеса было показано, что средняя напряженность магнитного поля солнечных пятен уменьшалась с 1920 гг. к максимуму 80–90-летнего цикла числа пятен. Таким же образом уменьшалось и число групп пятен с высокими значениями магнитной напряженности [2]. Наши исследования [4, 11] подтвердили уменьшение магнитных полей солнечных пятен с 1920–1940-х к 1960-м гг., а также выявили их увеличение в последующие десятилетия [11]. В недавних работах [8, 10] отрицаются как старые результаты [2], так и новые [4, 5, 11], поэтому в настоящее время нет единой точки зрения о реальности вековых вариаций магнитных полей на Солнце.

Мы сопоставили индекс RI числа пятен с индексом B_{sp} магнитных полей пятен, методика вычисления которого описана в работе [11]. При

сглаживании обеих величин 44-летним лагом (рис. 1) подтверждается вывод [2] об антикорреляции этих вековых индексов.

Можно сделать долгосрочный прогноз, основываясь на многолетней вековой цикличности чисел Вольфа и тесной антикорреляции вековых изменений: на протяжении нескольких десятков лет средние по 44 годам величины RI уменьшаются на 40 ± 20 единиц, а B_{sp} увеличатся на 10 ± 1 мТл по сравнению с периодом векового максимума чисел Вольфа. Из рис. 1 видно, что для прогноза [10] глубокого минимума чисел Вольфа в XXI ст. нет оснований, поскольку солнечная активность проявляется также сверхвековыми вариациями, и от очередного подобного маундеровскому минимуму нас отделяют столетия. Заметим, что точные краткосрочные прогнозы величины максимума 24–25-го циклов на основании выявленных закономерностей сделать невозможно, поскольку несглаженные среднегодовые значения RI и B_{sp} показывают нулевую корреляцию. Средние в четырех циклах максимальные числа Вольфа уменьшаются от максимума векового цикла к минимуму в 1.5 раза сильнее, чем среднегодовые по 44 годам величины. В период очередного векового минимума солнечной активности максимальные числа Вольфа по четырем циклам уменьшатся на 60 единиц (до $RI = 90 \pm 30$).

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МАГНИТНЫХ ИНДЕКСОВ

Индекс B_{sp} среднегодовых величин модуля индукции магнитного поля крупных пятен с диаметром 30–60 сд [11] рассчитывался двумя способами: 1 — определены средние значения B_{sp1} по всему массиву данных для всех обсерваторий и 2 — определялись средние значения B_{sp2} из среднегодовых значений, полученных отдельно для каждой обсерватории. В первом способе средняя квадратичная ошибка среднегодовой величины обусловлена большей мерой случайными отклонениями (до 30–50 мТл) каждого из сотен измерений. Во втором случае преимущественно систематические ошибки (до 10–20 мТл) каждой из 4–10 обсерваторий, измерявших в данном году магнитные поля, определяют среднюю квадратичную ошибку среднего значения.

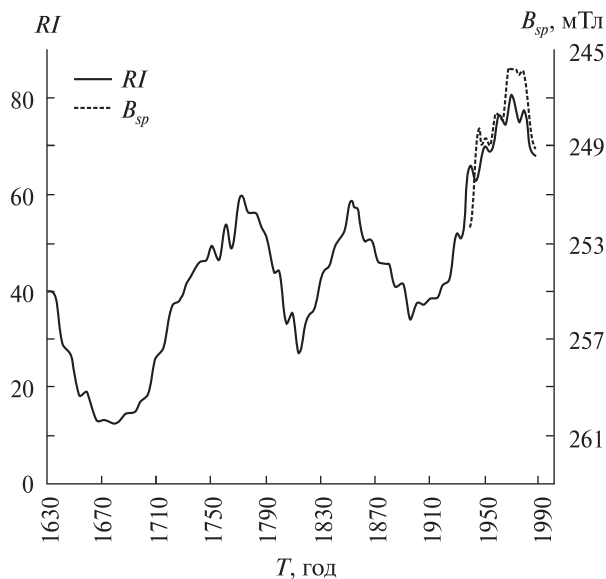


Рис. 1. Вековые вариации числа пятен RI и их магнитного поля B_{sp} (коэффициент корреляции $r = -0.86$ достоверен с доверительной вероятностью $p = 0.99$)

На рис. 2 представлены результаты вычислений среднегодовых значений B_{sp} этими двумя способами. Видно, что в доверительном интервале 95 % значения B_{sp1} и B_{sp2} совпадают.

Линейный тренд на рис. 2 обусловлен вековыми вариациями B_{sp} . Индукция магнитных полей крупных пятен за полстолетия увеличилась примерно на 10 мТл. Тренд числа пятен за этот период показывает их уменьшение. Поскольку вариации обоих индексов идентичны, а ошибки B_{sp1} в 1.3 раза меньше, чем у B_{sp2} , далее используем только первый индекс, называя его B_{sp} .

В работах [5, 6] получен ряд среднегодовых величин магнитного поля пятен всех размеров, позже названный H_m . Мы сравнили вариации индекса магнитного поля крупных пятен B_{sp} и H_m , для чего использовали данные Астрономической обсерватории Киевского университета, бюллетеней «Солнечные Данные», баз данных www.gao.spb.ru/database/mfbase/, <http://www.crao.crimea.ua/>, <ftp://howard.astro.ucla.edu/pub/obs/drawings/>. Оказалось, что индексы B_{sp} и H_m тесно коррелируют ($r = 0.68$, $p > 0.95$), оба индекса показывают увеличение поля во второй половине XX века.

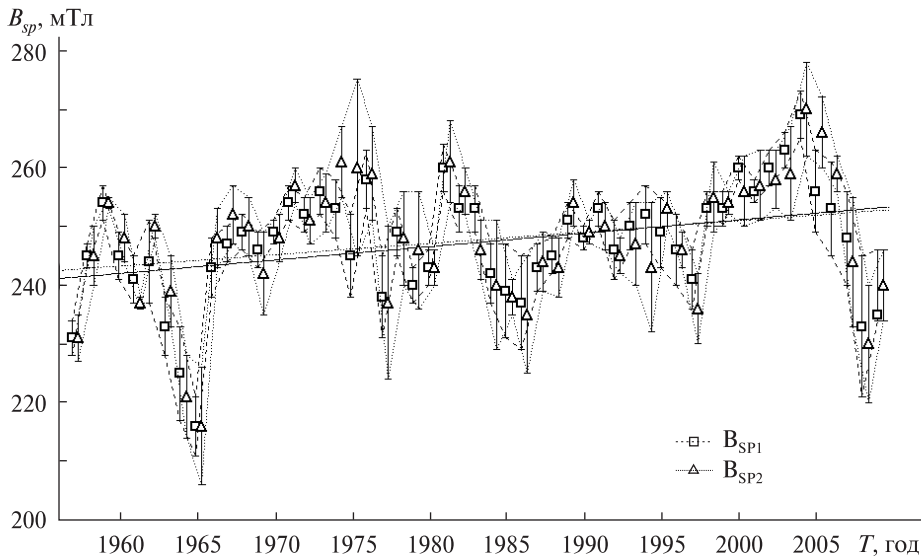


Рис. 2. Вариации модуля магнитных полей солнечных пятен: B_{sp1} — средние для всего массива полученных данных, B_{sp2} — средние из среднегодовых значений для каждой обсерватории. Приведены удвоенные средние квадратичные ошибки. Приведена линейная аппроксимация хода модуля магнитного поля по обоим индексам

Как выглядит вековой цикл магнитных полей при использовании не магнитометрических, а магнитографических измерений? В обсерватории Маунт Вилсон с 1970 г. регистрируются новые магнитографические индексы: магнитное поле факельных площадок *MPSI* (Magnetic Plage Strength Index) и магнитное поле пятен *MWSI* (Mt. Wilson Sunspot Index). Нами показано, что результат их вычисления зависит не только от магнитного поля факельных либо пятенных областей, но и от чисел Вольфа [3]. Для получения

MPSI складываются значения напряженностей магнитного поля по тем пикселям магнитограммы, где они были измерены в пределах от 10 до 100 Гс, и сумма делится на полное число пикселей магнитограммы. Для получения *MWSI* такая же процедура обработки проводится для всех пикселей, где магнитное поле превышает 100 Гс (10 мТл), то есть для пятенных участков (<http://www.astro.ucla.edu/>). Если бы деление проводилось не на полное число пикселей магнитограммы, а на сумму пикселей факельных участков для получения *MPSI* и на сумму пикселей пятенных участков для получения *MWSI*, тогда эти индексы характеризовали бы среднюю напряженность магнитного поля соответствующих структур.

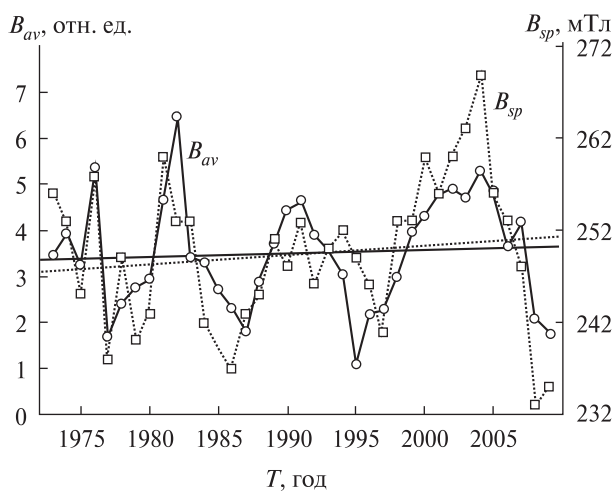


Рис. 3. Многолетние вариации нормированного индекса $B_{av} = 1000 \cdot MWSI / RI$ и индекса магнитного поля солнечных пятен B_{sp}

Проведем исправление индекса *MWSI* для получения независимого от числа пятен нового магнитографического индекса B_{av} , характеризующего среднегодовую напряженность участков активных областей, где магнитограф регистрировал поле свыше 10 мТл. Поскольку площадь пятен хорошо коррелирует с их числом, нормируя *MWSI* (индекс напряженности поля солнечных пятен) на числа Вольфа, получаем среднюю напряженность магнитного поля в пятенных областях. В таблице и на рис. 3 представлены значения полученного таким образом индекса B_{av} . Насколько такая процедура помогает получить чисто магнитный индекс, видно из совпадения и

межгодовых вариаций, и долговременных трендов B_{av} и B_{sp} на рис. 3.

Квазипериодические всплески магнитного поля означают всплытие нового магнитного потока. Из рис. 3 видно, что синхронно происходят усиления магнитного поля как в тени пятен, так и по всей площади пятна ($r = 0.68$), но с разной амплитудой. Относительный размах вариаций B_{sp} в центре тени пятен (15 %) на порядок меньше, чем в местах более слабого магнитного поля всего пятна B_{av} . Это можно объяснить различными значениями фактора заполнения тени и полутени субтелескопическими килогауссовыми трубками потока. В тени пятен фактор заполнения максимальный, до 95 % [7], и поэтому менее вариабельный, чем в полутени, где он в среднем равен 20 %.

Ввиду существенного различия факторов заполнения тени и полутени трубками потока изменения B_{av} отражают не столько усиление магнитного поля в трубках потока, сколько увеличение их количества на единицу площади. Например, при увеличении напряженности магнитного поля тени на 20 % магнитное давление увеличивается на 44 %. Равенство давления на границе тень-полутень поддерживается увеличением концентрации трубок потока в полутени, что и проявляется увеличением B_{av} . При этом увеличивается также отношение q диаметра тени к диаметру всего пятна (среднегодовые значения q изменяются от 0.12 до 0.26 [1]). Вековые вариации q , описанные в работе [1], действительно соответствуют вековым вариациям B_{sp} [11] с наибольшими значениями в эпоху 1930—1940 гг. и наименьшими в 1960-х гг.

Кроме межгодовых изменений напряженности магнитного поля пятен, на рис. 3 заметен вековой тренд. На протяжении 20—23-го циклов солнечной активности магнитное поле солнечных пятен увеличивалось. Поскольку в этот же временной интервал числа Вольфа имели тенденцию к снижению, подтвердилось правило, описанное Ю. И. Витинским [2]: вековые изменения чисел Вольфа и магнитных полей солнечных пятен происходят в противофазе.

Последние публикации [8, 10] отрицают вековое увеличение магнитных полей солнечных

Значения индексов магнитного поля солнечных пятен $MWSI$, B_{av} и B_{sp} . Стандартная ошибка B_{av} равна 0.1—0.2 отн. ед., B_{sp} — 1—3 мТл

Год	$MWSI$	B_{av} , отн. ед.	B_{sp} , мТл
1970	104	5.8	249
1971	67	5.1	254
1972	69	4.3	252
1973	38	3.5	256
1974	34	3.9	253
1975	15	3.3	245
1976	13	5.3	258
1977	27	1.7	238
1978	93	2.4	249
1979	155	2.8	240
1980	155	2.9	243
1981	140	4.7	260
1982	116	6.4	253
1983	67	3.4	253
1984	46	3.3	242
1985	18	2.7	239
1986	13	2.3	237
1987	29	1.8	243
1988	100	2.9	245
1989	158	3.7	251
1990	142	4.5	248
1991	146	4.7	253
1992	94	3.9	246
1993	55	3.6	250
1994	30	3.0	252
1995	18	1.1	249
1996	9	2.2	246
1997	22	2.3	241
1998	64	3.0	253
1999	93	4.0	253
2000	120	4.3	260
2001	111	4.8	256
2002	104	4.9	260
2003	64	4.7	263
2004	40	5.3	269
2005	30	4.9	256
2006	15	3.6	253
2007	8	4.2	248
2008	3	2.1	233
2009	2	1.8	235

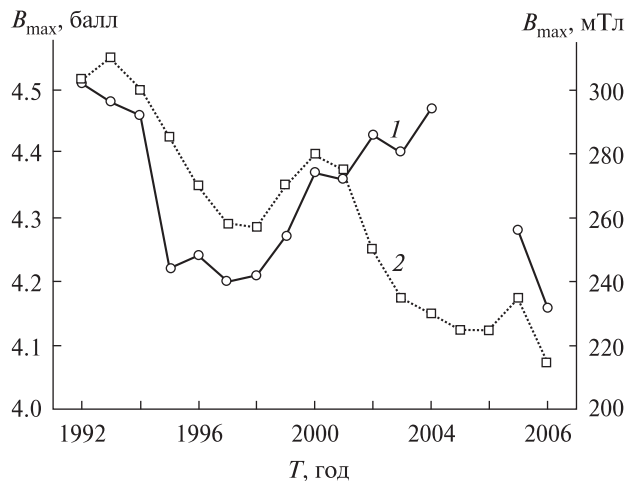


Рис. 4. Вариации среднегодовых значений максимального магнитного поля групп пятен по данным обсерваторий Маунт Вилсон (1, шкала слева, баллы 1—10 соответствуют напряженностям 10...50, 60...100, 110...150, 160...200, 210...250, 260...300, 310...350, 360...400, 410...450 и >450 мТл) и Китт Пик (2, шкала справа)

пятен в период после векового максимума чисел Вольфа в 1957 г., и даже свидетельствуют об их уменьшении в течение последних 17 лет [10]. Этот принципиальный вопрос рассмотрим более подробно.

Различия астроклимата, характеристик инструментов и наблюдательных программ обуславливают различные нижние границы измеряемых величин магнитного поля. Из-за этого различаются среднегодовые значения, и для получения индекса среднегодовых напряженностей H_m пятен всех размеров необходимо для каждой обсерватории применять поправочные коэффициенты, которые не могут быть одинаковыми для всех сезонов и всех диапазонов напряженности. Это может привести к неустранимым ошибкам. Поэтому на основании только одного индекса H_m можно сделать ошибочный вывод об отсутствии вариаций среднегодовых значений магнитного поля пятен. Ю. Р. Ривин [8] считает, что среднегодовые значения введенного им индекса H_{sp} (который фактически представляет собой H_m , но никак не B_{sp}) определяются в основном магнитными полями больших пятен.

Заметим, что последнее утверждение справедливо для B_{sp} , но не для H_m . Поэтому необходи-

мо отдельно рассматривать индексы вариаций магнитного поля пятен всех размеров H_m и крупных пятен в ограниченном диапазоне диаметров H_{sp} . Поскольку в наших работах [4, 11] показаны достоверные вариации величины магнитного поля крупных пятен B_{sp} , вывод Ю. Р. Ривина [8] об отсутствии изменений среднегодовых значений напряженностей магнитных полей пятен во второй половине XX ст. следует признать ошибочным.

Вторая работа, опровергающая наши выводы о вековом увеличении магнитных полей пятен, базируется на результатах измерений магнитных полей солнечных пятен в инфракрасном диапазоне на телескопе McMath Pierce обсерватории Китт Пик [10]. В этой работе получен вывод о значительном уменьшении напряженностей пятен в период с 1992 по 2009 г.

Для проверки этого вывода мы сравнили результаты [10] с измерениями B_{max} в обсерватории Маунт Вилсон (рис. 4). Величина B_{max} представляет собой усредненные за год значения наиболее сильного магнитного поля в каждой группе, независимо от её размера. Следовательно, индекс B_{max} имеет все недостатки, которые указаны выше в отношении индекса H_m .

При использовании измерений магнитного поля ведущих пятен из всех групп, без фильтрации пятен по размерам, возникает проблема нижней границы измеряемых напряженностей. Если рассчитать среднегодовые значения максимальных напряженностей по измерениям в Маунт Вилсон, но учитывать только пятна с магнитной индукцией свыше 150 мТл, как в работе [10], получим 203 ± 2 мТл для 2007 г. и 195 ± 3 мТл для 2008 г., что на 20—30 мТл ниже, чем в работе [10]. С 1992 по 2009 г. в обсерватории Маунт Вилсон проведено около 20 тыс. измерений, а в обсерватории Китт Пик за этот период измерено 1392 пятна. Следовательно, в обсерватории Китт Пик измеряли далеко не все пятна с индукцией свыше 150 мТл; по данным [10] до 1995 г. измерялись магнитные поля только крупных пятен.

Отсутствие максимума магнитных полей пятен в 2004 г. согласно данным [10], хорошо заметно по индексам B_{sp} и B_{av} (рис. 3) и по данным обсерватории Маунт Вилсон (рис. 4), также

подтверждает неоднородность выборки в работе [10]. Данные наблюдений в Маунт Вилсон, представленные в интернете, свидетельствуют о том, что их программа наблюдений постоянная и максимально широкая, измерения проводятся ежедневно за редкими исключениями пасмурных дней. На протяжении 1992—2009 гг. было только несколько ее изменений: в конце 1994 г. была заменена дифракционная решетка, что в среднем на 12 % изменило цену деления лайн-шифтера, что и дало скачкообразное падение измеренных напряженностей в 1995 г., в 2005 и 2006 гг. программа наблюдений была прервана и продолжена с января 2007 г.

Из графика результатов измерения магнитных полей на телескопе McMath Pierce обсерватории Китт Пик [10] четко видно, что после 2001 г. число измерений возросло, в программу измерений вошло больше слабых пятен, чем ранее, поэтому в этот период среднегодовые значения B_{\max} снизились. Если нижняя граница максимальных напряженностей не является неизменной из года в год, то есть программа наблюдений находится в стадии развития, тогда возникают нереальные тренды B_{\max} . Очевидно, что даже при неизменной программе наблюдений индекс B_{\max} , как и H_m , не является независимым от чисел Вольфа. Таким образом, вывод работы [10] о непрерывном уменьшении магнитного поля солнечных пятен с 1995 по 2009 гг. и о вероятном исчезновении пятен к 2014 г. — неверен. Для выявления реальных трендов корректнее пользоваться индексами B_{sp} и B_{av} , чем индексом B_{\max} .

Выводы о достоверности межгодовых вариаций и о положительных вековых трендах магнитного поля солнечных пятен на протяжении последних 50 лет подтверждается фактом влияния солнечных магнитных полей на земной магнетизм.

На рис. 5 показаны вариации среднегодовых значений потока F магнитного поля среднего пятна и индекс D_{st} ослабления горизонтальной составляющей магнитного поля Земли. Для расчета значений F отдельного пятна мы использовали значения индекса B_{sp} и среднегодовые площади солнечного пятна, вычисленные по данным сайта <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/>

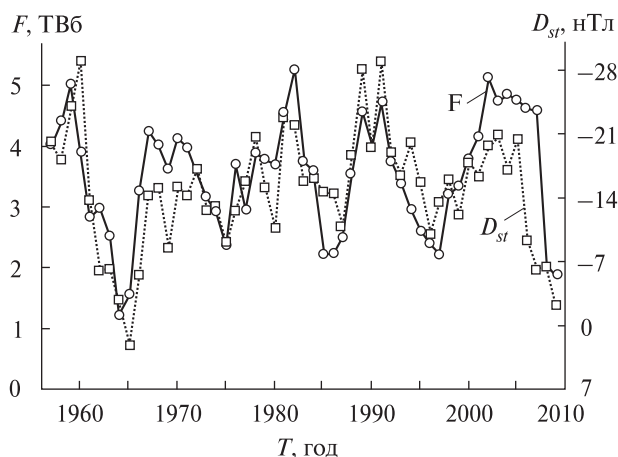


Рис. 5. Вариации среднегодовых значений потока F магнитного поля среднего пятна и индекс D_{st} ослабления горизонтальной составляющей магнитного поля Земли. Ошибки среднегодовых значений F не превышают 0.4 ТВб. Ошибки среднегодовых значений D_{st} не превышают 2 нТл

spaceweather.html. Известно, что часть магнитного потока пятен создает открытый магнитный поток Солнца [9]. Взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой Земли формирует кольцевой ток, ослабляющий магнитное поле Земли, интенсивность которого отражается в индексе D_{st} . Среднегодовые значения D_{st} найдены по среднесуточным величинам на сайте <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>. Коэффициент корреляции между этими величинами $r = -0.67$ ($p > 0.99$). От 20-го до 23-го цикла солнечной активности магнитный поток пятен увеличился на 10 % (эффект на уровне 2σ), что привело к такому же уменьшению напряженности горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

ВЫВОДЫ

1. Наблюдаются достоверные межгодовые и вековые вариации напряженности магнитных полей солнечных пятен, представленные индексом B_{sp} . Они формируют значительную часть вариаций магнитного поля солнечного ветра и Земли.

2. Антикорреляция между сглаженными по четырем 11-летним циклам числами пятен и их магнитным полем позволяет прогнозировать их

изменения в вековом цикле. В период очередного векового минимума солнечной активности максимальные числа Вольфа уменьшаются до $RI = 90 \pm 30$.

3. Анализ межгодовых вариаций магнитных полей солнечных пятен, измеренных в обсерваториях Кит Пик [10] и Маунт Вилсон с 1992 по 2008 гг. показал, что вывод Ливингстона и Пена (2009) о вероятном исчезновении пятен к 2014 г. ошибочный, так как основан на неоднородных данных наблюдений.

4. Нормированием индекса MWSI на числа Вольфа мы получили новый индекс B_{av} — среднегодовые значения магнитных полей в областях Солнца с напряженностью магнитного поля свыше 100 Гс. На протяжении четырех десятилетий этот магнитографический индекс, как и магнитометрический индекс B_{sp} , при линейной аппроксимации показывает увеличение магнитного поля.

5. Положительная достоверная корреляция между напряженностью B_{sp} магнитного поля в центре пятна и средней напряженностью B_{av} по всей площади пятна говорит о синхронных изменениях как напряженности на оси трубок потока, так и фактора заполнения ими площади полутени пятен.

Автор благодарна всем наблюдателям магнитных полей солнечных пятен и составителям бюллетеня «Солнечные данные», создателям электронных баз данных измерений магнитных полей солнечных пятен.

1. Блудова Н. Г., Обридко В. Н. Вариации относительной площади тени пятен за 1874—1976 гг. // Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений: Тр. Междунар. конф. — С. Пб., 2007. — С. 55—58.
2. Витинский Ю. И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. — Л.: Наука, 1973. — 258 с.
3. Лоцикая Н. И. Сравнение новых индексов солнечной активности // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 2002. — 98. — С. 187—188.
4. Лоцикая Н. И., Лямова Г. В., Малащук В. М. Сравнение результатов визуальных измерений магнитных полей крупных солнечных пятен, выполненных в разных обсерваториях в 23 цикле солнечной актив-

ности // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 2007. — 103. — С. 60—67.

5. Милецкий Е. В., Наговицын Ю. А. Временные вариации среднегодовых значений напряженности магнитных полей солнечных пятен // Солнце в эпоху смены знака магнитного поля: Тр. Междунар. конф. — С. Пб., 2001. — С. 281—283.
6. Милецкий Е. В., Наговицын Ю. А., Бембеева И., Федорова Т. Новый индекс магнитных полей солнечных пятен // Солнечная активность и космические лучи после смены знака полярного магнитного поля Солнца: Тез. докл. Междунар. конф. — С. Пб., 2002. — С. 62.
7. Обридко В. Н. Солнечные пятна и комплексы активности. — М.: Наука, 1985. — 256 с.
8. Ривин Ю. П. Магнитное поле солнечных пятен во второй половине прошлого века по среднегодовым значениям // Солнечная и солнечно-земная физика: Тр. Всерос. конф. — С. Пб., 2008. — С. 333—336.
9. Krivova N. A., Balmaceda L., Solanki S. K. Reconstruction of solar total irradiance since 1700 from the surface magnetic flux // Astron. and Astrophys. — 2007. — 467. — P. 335—346.
10. Livingston W., Penn M. Are sunspots different during this solar minimum? // Eos. Trans. Amer. — 2009. — 90, N 30. — P. 257—264.
11. Lozitska N. I. Interannual Variations of the Sunspots Magnetic Fields from 1924 to 2004 // Кинематика и физика небес. Тел. Приложение (Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.). — 2005. — N 5. — P. 151—152.

Надійшла до редакції 14.05.10

N. I. Lozitska

SECULAR VARIATIONS OF SUNSPOT MAGNETIC FIELDS: THE COMPARISON OF VARIOUS INDEXES

It is found that interannual and secular sunspot magnetic field variations really exist and differ strongly from Wolf's number variations. Trends of magnetic field module B_{max} are essentially differ for the results of the Maunt Wilson and Kitt Peak observations made during 1992—2008. The source of this discrepancy is analyzed. It is shown that the index B_{sp} is practically independent of observation program completeness, instrument quality and astroclimate conditions, and therefore it is suitable for global monitoring of interannual and secular variations of solar magnetic fields. Our study includes data from the Combined database of sunspot magnetic fields at the Pulkovo Observatory, Crimean sunspot magnetic fields archive and data from the synoptic program at the 150-Foot Solar Tower of the Mt. Wilson Observatory. The Mt. Wilson 150-Foot Solar Tower is operated by UCLA, with funding from NASA, ONR and NSF, under agreement with the Mt. Wilson Institute.