

УДК 523.982.8

ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПЯТЕН ПО ИЗМЕРЕНИЯМ НА ТЕЛЕСКОПЕ БСТ-2 КРАО РАН В 24-ОМ ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2021 г. Ю. Т. Цап^{1, *}, Н. И. Клиорин^{2, **}, З. С. Ахтемов^{1, ***}, В. М. Малащук^{1, ****}

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН,
пос. Научный, Крым, Россия

²Департамент механики, факультет инженерных наук, университет
им. Бен-Гуриона в Негеве, г. Беэр-Шева, Израиль

*e-mail: yur_crao@mail.ru

**e-mail: nat@bgu.ac.il

***e-mail: azis@craocrimea.ru

****e-mail: mym_valya@bk.ru

Поступила в редакцию 01.03.2021 г.

После доработки 19.03.2021 г.

Принята к публикации 27.05.2021 г.

На основе многолетних спектральных наблюдений расщепления зеемановских компонент линии FeI 630.2 нм, проводимых на Башенном солнечном телескопе БСТ-2 Крымской астрофизической обсерватории, исследована эволюция усредненных значений магнитного поля солнечных пятен с напряженностью ≥ 1500 Гс за период с 2010 по 2018 г. (всего 4771 измерение). Обнаружено, что в отличие от чисел Вольфа, усредненное магнитное поле пятен со временем существенно не меняется. Более того, оно очень слабо возрастает и достигает максимума к концу 24-го цикла активности Солнца. Полученные результаты свидетельствуют в пользу важной роли “отрицательного” магнитного давления в формировании пятен на малых глубинах вблизи поверхности Солнца.

DOI: 10.31857/S0016794021050151

1. ВВЕДЕНИЕ

Спонтанное образование самоорганизующихся магнитных структур, таких как пятна и поры, является одной из интересных и самых старых проблем, связанных с взаимодействием конвекции и магнитных полей на разных уровнях. Наблюдения за образованием пятен и пор показывают быстрый процесс накопления возникающего магнитного поля в стабильные долгоживущие (дни–недели) магнитные структуры. Однако физические механизмы накопления потока в компактные магнитные конструкции с высокой напряженностью поля и запасом устойчивости до сих пор не ясны.

Периодические изменения числа солнечных пятен указывают на то, что их образование связано с глобальными динамо-процессами на Солнце, которые плохо изучены. С другой стороны, очевидная самоорганизация магнитных полей в компактные структуры показывает важность локальной динамики турбулентной конвекции. Стандартная теория динамо Паркера и некоторые наблюдательные данные предполагают наличие связи напряженности магнитного поля пятен

с генерируемой в конвективной зоне глобальной тороидальной компонентой поля, определяющей цикл солнечной активности. Существует и альтернативная точка зрения, согласно которой пятна формируются на небольшой глубине (~10 тыс. км) вблизи поверхности Солнца под воздействием турбулентных движений [Kleeeorin et al., 1989, 1990]. Это приводит к концентрации магнитного потока из-за развития неустойчивости “отрицательного” магнитного давления (negative effective magnetic pressure instability – NEMPI-механизм), который затем выносится паркеровской силой плавучести в фотосферу.

Из вышесказанного следует необходимость разработки наблюдательного теста, свидетельствующего в пользу той или иной модели. На наш взгляд, можно воспользоваться тем обстоятельством, что NEMPI-механизм предполагает слабую зависимость величины типичного поля в пятне от цикла и фазы солнечной активности. Это позволяет, изучая динамику надежно измеренных полей пятен, выяснить какая из моделей более правдоподобна. При этом хотелось бы особо подчеркнуть, что спутниковые измерения на-

пряженности пятен на Solar Dynamic Observatory (SDO) или Hinode, проводимые соответственно с помощью Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) и Spectro-Polarimeter, имеют ряд существенных недостатков. Сюда можно отнести эффект насыщения [Liu et al., 2012], а также необходимость измерений параметров Стокса и численного решения довольно сложного модельно зависимого уравнения переноса поляризованного излучения Унно-Рачковского [Lites, 2011].

Ранее Pevtsov et al. [2011] изучали долговременный тренд магнитных полей солнечных пятен. Причем для каждого дня наблюдений выбиралось пятно с самым сильным полем. Затем, с использованием комбинированных данных семи обсерваторий за период с 1957 по 2011 г., была построена зависимость усредненных за год максимальных суточных значений магнитных полей пятен от времени. Согласно полученным результатам, напряженность поля солнечных пятен меняется циклически в пределах нескольких сот гаусс, достигая максимума около пика каждого цикла, хотя синхронность не является абсолютной.

В следующей работе [Pevtsov et al., 2014] к объединенным данным семи обсерваторий из предыдущей статьи были добавлены данные по измерению магнитных полей пятен обс. Маунт Вильсон за период с 1920–1958 год. Следуя модифицированному подходу, аналогичному представленному в предыдущей работе [Pevtsov et al., 2011], выбиралось пятно с самым сильным полем для каждой недели наблюдений и таким образом вычислялось среднемесячное или среднегодовое значение напряженности. Результаты наблюдений на Маунт Вильсон масштабировали по российскому набору данных. Как и в предыдущей работе, снова был сделан вывод о существовании корреляции, хотя и с некоторым сдвигом, усредненной напряженности магнитных полей пятен с циклом солнечной активности. Однако это несколько противоречит результатам работы [Livingston and Watson, 2015]. Противоречивыми являются и многочисленные исследования корреляции между контрастностью пятен и активностью Солнца [например, Rezaei et al., 2015].

Цель настоящей работы исследовать эволюцию значений магнитного поля солнечных пятен с напряженностью $B \geq 1500$ Гс, усредненных за различные промежутки времени, на основе анализа визуальных спектральных наблюдений расщепления зеемановских компонент линии FeI 630.2 нм, проводимых на Башенном солнечном телескопе (БСТ-2) КрАО РАН с 1957 г.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Для проведения исследований нами использовались данные о максимальных значениях маг-

нитных полей пятен, полученные на БСТ-2 КрАО РАН с помощью визуальных спектральных измерений расщепления зеемановских компонент линии FeI 630.2 нм с g -фактором 2.5 [Lozitska et al., 2015; Tsap et al., 2019]. На рисунке 1 показан пример сводки с результатами наблюдений напряженностей солнечных пятен в КрАО РАН. Все имеющиеся данные находятся в свободном доступе на сайте (<https://sun.crao.ru/observations/sunspots-magnetic-field>). Реальная ошибка одного измерения магнитного поля пятен составляет $\pm(100-200)$ Гс. Отметим, что в среднем за год в Крыму насчитывается около 200 ясных дней.

Для изучения эволюции усредненных значений магнитного поля солнечных пятен нами был выбран период с 2010 по 2018 г. В значительной мере это объясняется тем, что Livingston and Watson [2015] проводили измерения полей пятен с $B \geq 1500$ Гс тем же методом с 2010 по 2015 гг., но на другом инструменте (McMath-Pierce Solar Telescope in Arizona) в линии FeI 1564.85 нм.

Гистограмма распределения максимальных значений напряженности магнитного поля пятен с $B \geq 1500$ Гс, всего измерений $N = 4771$, с интервалом 200 Гс приведена на рис. 2. Как видно, наиболее часто встречаются пятна с магнитным полем в диапазоне значений от 1800 до 2000 Гс., при этом максимальные напряженности не превышают 4000 Гс.

Число Вольфа или относительное цюрихское число является одним из основных количественных показателей солнечной активности, который начали применять с 1849 г. Поэтому для проведения сравнительного анализа мы воспользовались данными, находящиеся в свободном доступе на сайте Королевской обс. Бельгии (<http://www.sidc.oma.be>).

Графики изменения со временем напряженности магнитного поля пятен $B(t)$, построенные по данным БСТ-2 КрАО РАН, а также чисел Вольфа $W(t)$, усредненные за 3 месяца, полгода и год, представлены на рис. 3. Как легко видеть, зависимости $B(t)$ и $W(t)$ ведут себя различным образом. Коэффициент корреляции Пирсона не превышает 0.1. Обращает на себя внимание тренд, связанный с незначительным увеличением магнитного поля пятен от максимума к минимуму солнечной активности. Отметим также, что среднее значение магнитного поля за рассматриваемый период оказалось равным 2120 ± 10 Гс.

Ранее Livingston and Watson [2015] также пришли к заключению, что усредненные магнитные поля пятен с $B \geq 1500$ Гс за период с 2010 по 2015 г. слабо зависят от фазы цикла. При этом средняя напряженность магнитного поля пятен оказалась равной 2070 ± 20.0 Гс, а для данных HMI/SDO — 2050 ± 18.0 Гс. Таким образом, полученные нами

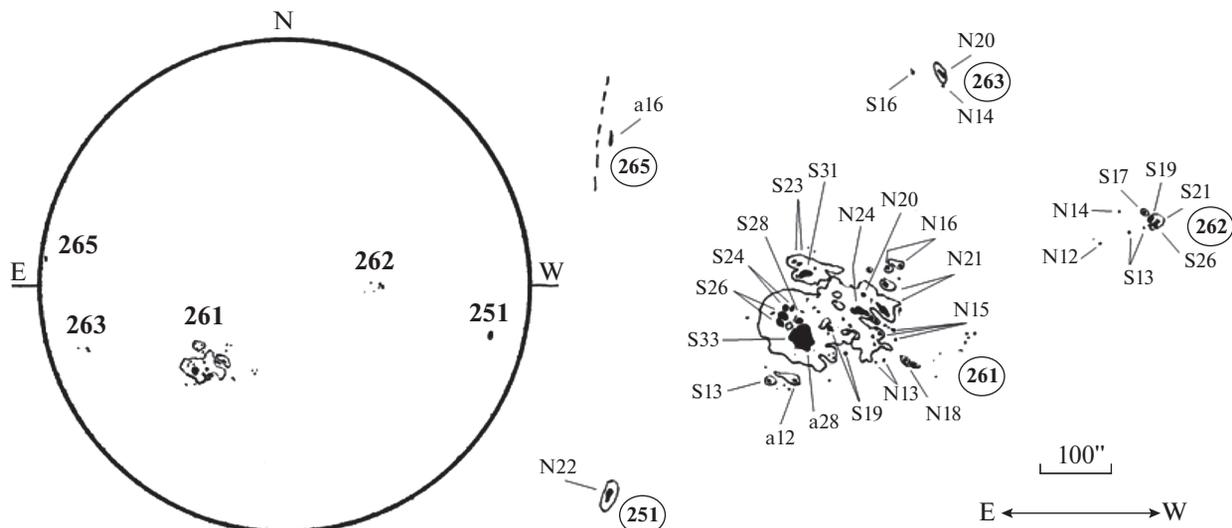


CRIMEAN ASTROPHYSICAL OBSERVATORY

Sunspot magnetic fields Fe I 630.2 nm in 100 Gs

October 22 2014 06:35 UT Seeng 4 Scintillation 2" Observer Z. Akhmetov

Crimean numbers	251	261	262	263	265						
NOAA numbers	2187	2192	2193	2194							



http://sun.crao.ru/~data/sunspots/2014_10/221014.jpg

Рис. 1. Пример зарисовки магнитных полей солнечных пятен, полученной 22.10.2021 г. на БСТ-2 КрАО РАН. Взят с сайта (http://sun.crao.ru/~data/sunspots/2014_10/221014.jpg).

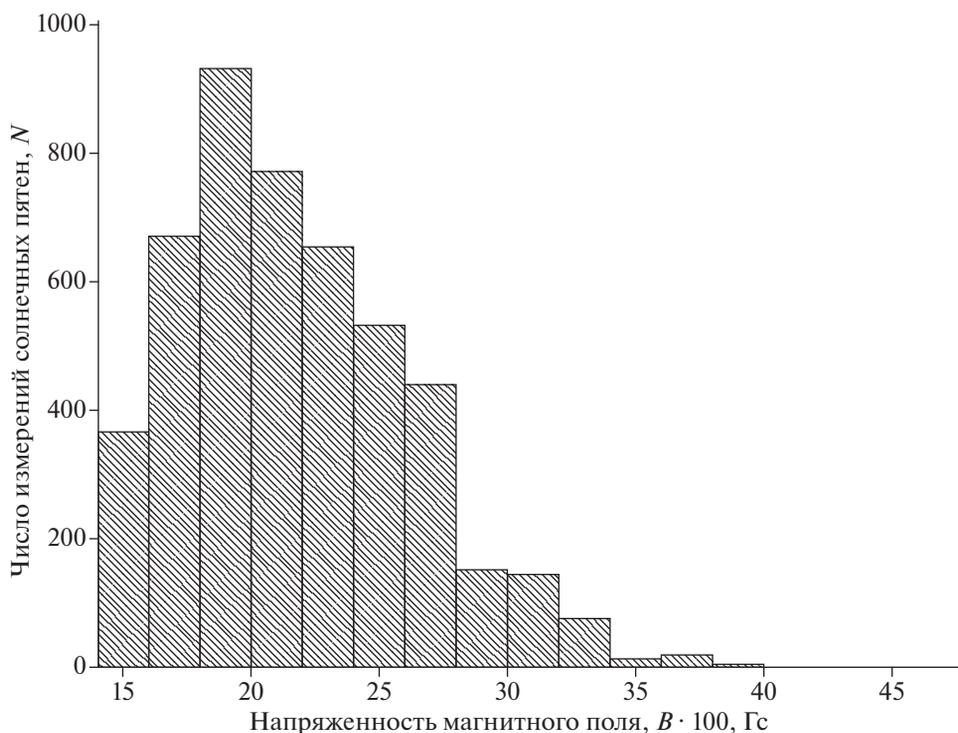


Рис. 2. Гистограмма распределения магнитного поля солнечных пятен (число измерений $N = 4771$) с напряженностью $B \geq 1500$ Гс за период с 2010 по 2018 г. Единичный интервал по горизонтальной оси соответствует 200 Гс.

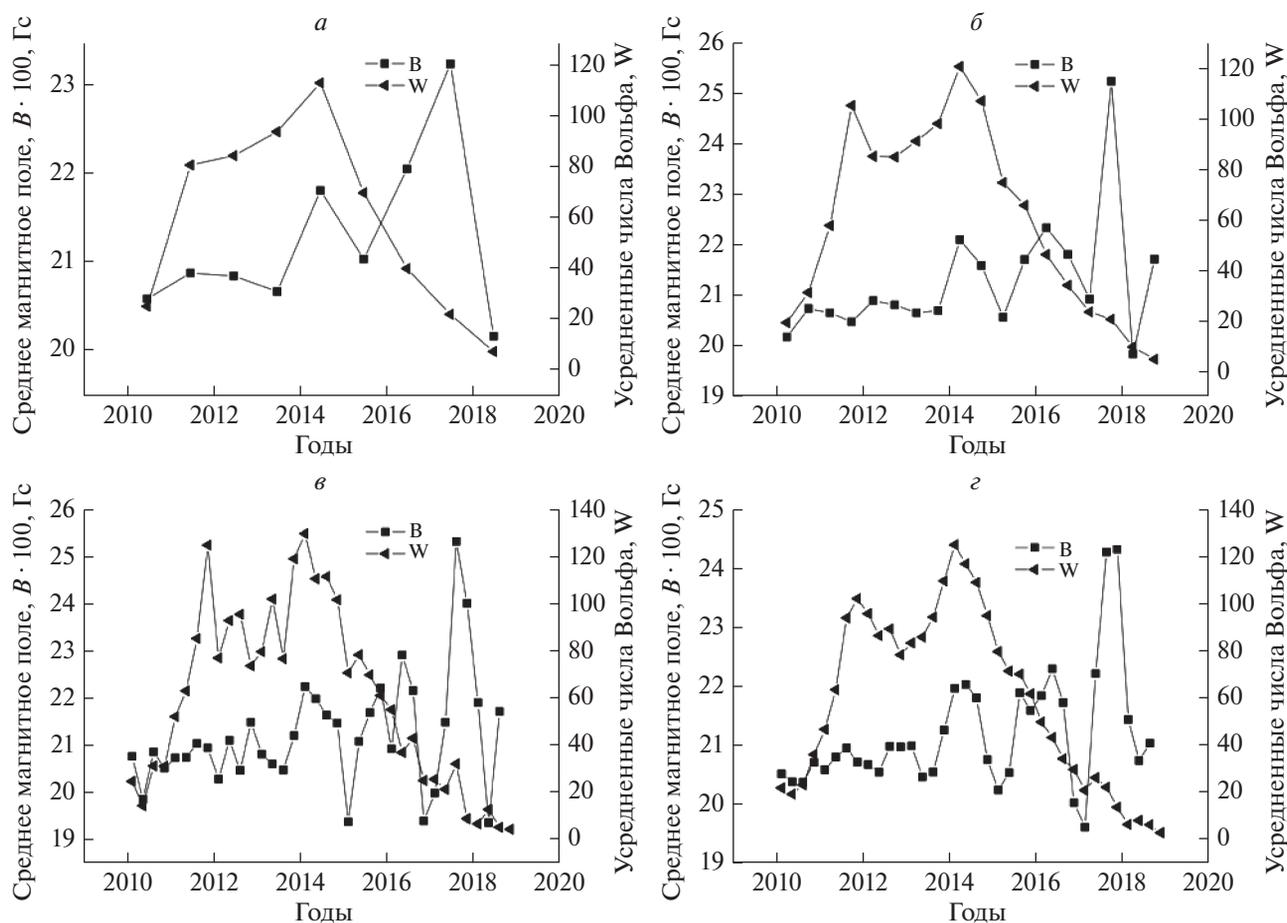


Рис. 3. Эволюция усредненных значений напряженности магнитного поля солнечных пятен $B(t)$ и чисел Вольфа $W(t)$ с 2010 по 2018 г.: (а) – усреднение за год, (б) – за полгода, (в) – за три месяца, (з) – усреднение за три месяца после сглаживания.

результаты достаточно хорошо согласуются с выводами работы [Livingston and Watson, 2015].

4. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнив динамику эволюции усредненных значений напряженности магнитного поля солнечных пятен и чисел Вольфа, нам не удалось обнаружить какой-либо значимой корреляции между исследуемыми величинами. Более того, поле даже очень слабо возрастает с уменьшением активности Солнца и к концу 24-го цикла достигает максимума, тогда как числа Вольфа имеют минимальные значения.

На наш взгляд, возможное объяснение может быть связано с механизмом концентрации (филаментации) магнитного поля, предложенном в работах [Kleeorin et al., 1989, 1990], согласно которому в конвективной зоне на небольшой (~ 10 тыс. км) глубине может развиваться крупномасштабная МГД-неустойчивость из-за эффекта “отрицательного” магнитного давления. Нестабильность

возникает вследствие уменьшения турбулентного гидромагнитного давления под действием магнитного поля. Природу NEMPI-механизма можно легко понять, исходя из следующих простых соображений.

В случае изотропной турбулентности турбулентное давление можно представить следующим образом

$$p_t = W_m/3 + 2/3W_k, \quad (1)$$

где W_m – плотность энергии магнитных пульсаций, W_k – плотность энергии гидромагнитной турбулентности. Поскольку полная энергия

$$W_t = W_m + W_k, \quad (2)$$

сохраняется, то из (1) и (2) следует, что

$$p_t = 1/3(2W_t - W_m).$$

Таким образом, магнитные флуктуации приводят к уменьшению турбулентного давления и соответственно к увеличению концентрации по-

ля, что хорошо согласуется с результатами численного моделирования [Brandenburg et al., 2016].

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Кратко сформулируем основные результаты работы.

– Среднее магнитное поле солнечных пятен с $B \geq 1500$ Гс за период с 2010 по 2018 г. слабо зависит от фазы цикла солнечной активности, что хорошо согласуется с выводами работы [Livingston and Watson, 2015].

– Получены указания в пользу формирования солнечных пятен посредством NEMPI-механизма, предложенного в работах [Kleerorin et al., 1989, 1990].

– Обнаруженные расхождения с результатами работ Petsov et al. [2011, 2014] требуют дальнейшего анализа.

В значительной мере наш подход основан на хорошо известном факте, что площадь солнечных пятен с ростом их числа увеличивается [например, Kiepenheuer, 1953; Bracewell, 1988]. В свою очередь, площадь магнитного поля пятна пропорциональна напряженности поля (например, Bray and Loughhead, 1967; Schad, 2014; Обридко и Наговицын, 2017). Поскольку наиболее развитые активные области содержат крупные пятна, то это предполагает наличие связи между напряженностью магнитного поля этих пятен и тороидальной компонентой динамо Паркера. Последнее обстоятельство и было нами использовано в настоящей работе.

В заключение отметим, что проведенные исследования охватывают лишь 24-ый цикл солнечной активности, который считается аномальным по многим причинам. Вследствие этого полученные результаты нельзя считать достаточно убедительными. Однако мы надеемся продолжить наши исследования, охватив не только 24-ый, но и 21–23-ий циклы солнечной активности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной поддержке Минобрнауки (НИР № 0831-2019-0006) и Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 20-52-26006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Обридко В.Н., Наговицын Ю.А. Солнечная активность, цикличность и методы прогноза, СПб: Изд-во ВВМ, 466 с. 2017.
 – Babin A.N., Koval A.N., Tsap Yu. T. Borisenko A.V. On a Magnetic Anomaly in the Umbra of the Following Spot of an NOAA 12192 Active Region // Geomagnetism and Aeronomy. V. 58. P. 1149–1158. 2018.
<https://doi.org/10.1134/S0016793218080029>

– Bracewell R.N. Three-halves law in sunspot cycle shape // MNRAS. V. 230. P. 535–550. 1988.

– Bradenburg A., Rogachevskii I., Kleerorin N. Magnetic concentration in stratified turbulence: the negative effective magnetic pressure instability // New J. Phys. V. 18. P. 1250011. 2016.
<https://doi.org/10.1088/1367-2630/aa513e>

– Bray R., Loughhead R. Sunspots. London: Chapman and Hall Ltd, 320 p. 1964

– Kiepenheuer K.O. The Sun. Chicago: University Press. ed. Kuiper G. P. 322–377. 1953.

– Kleerorin N., Rogachevskii I., Ruzmaikin A. Negative magnetic pressure as a trigger of largescale magnetic instability in the Solar convective zone // Sov. Astron Lett. V. 15. № 5. P. 274–277. 1989.

– Kleerorin N.I., Rogachevskii I.V., Ruzmaikin A.A. Magnetic force reversal and instability in a plasma with advanced magnetohydrodynamic turbulence // Sov. Phys. JETP. V. 70. P. 878–883. 1990.

– Lites B.W. Hinode observation suggesting the presence of a local small-scale turbulent dynamo // The Astrophysical J. V. 737:52. № 2. P. 1–9. 2011.

<https://doi.org/10.1088/0004-637X/737/2/52>

– Liu Y., Hoeksema J.T., Scherrer P.H., Schou J., Couvidat S., Bush R.I., Duvall T.L., Hayashi K., Sun X., Zhao X. Comparison of Line-of-Sight magnetograms taken by the Solar Dynamics Observatory/Heliographic and Magnetic Imager and Solar and Heliospheric Observatory/Michelson Doppler Imager // Solar Physics. V. 279. Is. 1. P. 295–316. 2012.
<https://doi.org/10.1007/s11207-012-9976-x>

– Livingston W., Watson A. New solar signal: Average maximum sunspot magnetic fields independent of activity cycle // Geophys. Res. Lett. V. 42. P. 9185–9189. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2015GL065413>

– Lozitska N.I., Lozitsky V.G., Andryeyeva O.A., Akhtemov Z.S., Malashchu V.M., Perebeynos V.A., Stepanyan N.N., Shtertser N.I. Methodical problems of magnetic field measurements in umbra of sunspots // Adv. Space Res. V. 55. P. 897–907. 2015.

– Petsov A.A., Nagovitsy, Y., Tlatov A., Rybak A. Long-term trends in sunspot magnetic fields // Astrophys. J. Lett. V. 742:L36. (P1–4). 2011.
<https://doi.org/10.1088/2041-8205/742/2/L36>

– Petsov A.A., Bertello L., Tlatov A.G., Kilcik A., Nagovitsyn Y.A., Cliver E.W. Cyclic and long-term variation of sunspot magnetic fields // Solar Physics. V. 289. Is. 2. P. 593–602. 2014.
<https://doi.org/10.1007/s11207-012-0220-5>

– Rezaei R., Beck C., Lagg A., Borrer J.M., Schmidt W., Colados M. Variation in sunspot properties between 1999 and 2014 // Astron. Astrophys. V. 578. Id. A43. P. 1–9. 2015.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/20111863>

– Schad T.A. On the Collective magnetic field strength and vector structure of Dark Umbral Cores Measured by the Hinode Spectropolarimeter // Solar Phys. V. 289. P. 1477–1498. 2014.
<https://doi.org/10.1007/s11207-013-0412-7>

– Tsap Yu. T., Perebeynos V.A., Borisenko A.V., Lozitska N.I., Shtertser N.I., Motorina G.G., Kuleshova A.I. Measurements of strong magnetic fields in umbra of sunspots: Crimea vs Mt. Wilson // AApTr. V. 31. P. 363–367. 2019.