

DOI: 10.54503/0571-7132-2023.66.4-571

ПОПЕРЕЧНЫЕ ГРАДИЕНТЫ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ С РАЗНЫМ УРОВНЕМ ВСПЫШЕЧНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ. I. МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ И ДИНАМИКА ВЫБРАННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Ю.А.ФУРСЯК

Поступила 20 июля 2023

Принята к печати 28 ноября 2023

Задача исследования - изучение динамики параметров, описывающих поперечную составляющую градиента продольного магнитного поля $\nabla_{\perp} B_z$ в активных областях (АО) с разным уровнем вспышечной продуктивности. Используя данные, полученные инструментом Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) на борту Solar Dynamics Observatory (SDO), проанализированы 75 АО 24-го цикла солнечной активности. Для вычисления величины $\nabla_{\perp} B_z$ применены два подхода - современный и классический. В каждом случае определены параметры, описывающие величину $\nabla_{\perp} B_z$ в АО. Для современного подхода это средняя $\nabla_{\perp} B_z$ по АО величина - $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ и средняя величина $\nabla_{\perp} B_z$ в окрестности точки с максимальным его значением - $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle$, для классического подхода - максимальное значение $\nabla_{\perp} B_z$ между парами пятен в АО - $\max (\nabla_{\perp} B_z)_{sp}$. Изучена динамика выбранных параметров за время мониторинга каждой из областей анализируемой выборки. Показано, что: 1. Разброс значений величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ небольшой (для подавляющего большинства исследуемых областей находится в пределах 0.08-0.12 Гс км⁻¹) и мало различается для областей с низкой и высокой вспышечной продуктивностью. 2. Численные значения параметра $\max (\nabla_{\perp} B_z)$ и его динамика в подавляющем большинстве рассмотренных случаев больше в областях с более высоким уровнем вспышечной продуктивности. 3. Численные значения параметра $\max (\nabla_{\perp} B_z)_{sp}$ и его динамика больше в областях с более высоким уровнем вспышечной продуктивности. 4. В АО NOAA 11283 зафиксирован стабильный рост величины $\max (\nabla_{\perp} B_z)_{sp}$ приблизительно за 19 ч до начала развития первой из серии вспышек высоких рентгеновских классов.

Ключевые слова: *Солнце: активные области: вспышечная активность:
магнитное поле: градиенты магнитного поля*

1. *Введение.* Как отмечал А.Б.Северный, даже "простейшее рассмотрение баланса энергии показывает, что внутри солнечной атмосферы нет другого источника энергии вспышек, кроме энергии магнитного поля" [1]. Именно поэтому изучение магнитных полей на Солнце, их эволюция, является первым, и, несомненно, необходимым шагом в исследовании активных процессов и явлений, наблюдаемых в солнечной атмосфере. И хотя описание нестационарных процессов в атмосфере Солнца в терминах электрического тока часто является более информативным, чем в терминах магнитного поля

[2] (поскольку электрические токи тесно связаны с непотенциальными магнитными полями), следует заметить, что информацию об электрических токах невозможно получить без надежных измерений магнитных полей.

Первые измерения магнитных полей в солнечных пятнах были выполнены Дж.Э.Хэйлом в 1908г. с использованием спектрографических данных башенного солнечного телескопа обсерватории Маунт-Вилсон [3]. В дальнейшем возникла необходимость измерения и более слабых магнитных полей. Однако первые попытки подобных измерений, выполненные с применением фотоэлектрических методов Дж.Э.Хэйлом и коллегами в 1933г., успехом не увенчались.

Проблема измерения слабых магнитных полей на Солнце была решена Г.Бэбкоком в 1952г. с созданием фотоэлектрического магнитографа [4]. Через несколько лет аналогичный прибор был смонтирован на башенном солнечном телескопе Крымской астрофизической обсерватории [5], а уже к середине 60-х годов XXв. магнитографы появились во многих крупных обсерваториях и научно-исследовательских институтах, занимающихся изучением Солнца, таких как ИЗМИРАН [6], Пулковская обсерватория [7], СибИЗМИР [8], обсерватория Клаймакс [9], обсерватория Китт-Пик [10] и др. Началось систематическое изучение магнитных полей в атмосфере Солнца.

Во второй половине 50-х годов XXв. на основе обширного наблюдательного материала астрономами Крымской астрофизической обсерватории был сделан вывод о тесной связи магнитных полей с нестационарными процессами в солнечной атмосфере [11,12 и др.]. Перед исследователями возникла задача поиска параметров магнитного поля, которые можно оценить, не прибегая к сложным математическим вычислениям, и в то же время легко связать с динамикой вспышечной продуктивности активной области (АО). Наиболее простыми из этих параметров являются: напряженность магнитных полей отдельных пятен в группе, сложность магнитной конфигурации, пространственная ориентация и сложность линии раздела полярностей магнитного поля, суммарный беззнаковый магнитный поток АО и др. Несколько более сложным параметром в вычислении является градиент продольного магнитного поля. Следует отметить, что здесь речь идет только о поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля $\nabla_{\perp} B_z$, поскольку, несмотря на создание еще в 60-х годах XXв. многоканальных вектор-магнитографов [13,14], подавляющее большинство инструментов для исследования Солнца даже сегодня осуществляют измерения магнитных полей только на одном уровне солнечной атмосферы, преимущественно в фотосфере. Лишь немногие исследовательские работы, часть которых теоретические [15-17], содержат информацию о величинах вертикальной составляющей градиента продольного магнитного поля [18,19].

В конце 50-х годов XX в. группой крымских астрономов во главе с А.Б.Северным были изучены $\nabla_{\perp} B_z$ и их динамика перед солнечными вспышками и после них. Было отмечено, что "вспышки возникают в нейтральных точках (областях) магнитного поля групп пятен при значительном градиенте поля возле этих точек" [20]. В 1959г. на основе накопленного наблюдательного материала был произведен статистический анализ и обнаружено, что мощные вспышечные процессы возникают в областях с градиентом продольного магнитного поля, превышающим значение 0.1 Гс км^{-1} [21]. Эти результаты позже были подтверждены в ряде исследований [22,23 и др.]. Тесная связь высоких градиентов магнитного поля с мощными эруптивными событиями в атмосфере Солнца была обнаружена и по результатам наблюдений в других обсерваториях, например, в Медонской [24,25]. В конце 70-х годов XX в. пороговое значение градиента продольного магнитного поля в 0.1 Гс км^{-1} было заложено советскими астрономами как один из параметров, позволяющих сделать достаточно точный (с оправдываемостью более 80%) прогноз вспышечной продуктивности АО с заблаговременностью 1-3 дня [26,27].

Созданные в последнее время инструменты для измерения магнитных полей на Солнце, особенно находящиеся в космическом пространстве, обладают целым рядом преимуществ по сравнению с магнитографами ранних моделей. В первую очередь - возможностью круглосуточного мониторинга Солнца с высоким пространственным и временным разрешением. Так, если разрешающая сила магнитографа Бэбкока составляла порядка $38'' \times 70''$, магнитографа Крымской астрофизической обсерватории - $15'' \times 30''$, что соответствует площади $11000 \times 22000 \text{ км}$ на уровне фотосферы Солнца, то, например, современный инструмент Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) [28] на борту Solar Dynamics Observatory (SDO) [29] имеет пространственное разрешение на уровне солнечной фотосферы порядка $0''.5$ ($\approx 360 \text{ км}$), а спектрополяриметр SOT-SP/Hinode [30] - порядка $0''.3$ ($\approx 220 \text{ км}$).

Данная статья является логическим продолжением работ крымских астрономов второй половины XX в., посвященных градиентам продольного магнитного поля, и недавно опубликованного автором исследования [31]. Здесь ставится задача кратко рассмотреть существующие методы вычисления $\nabla_{\perp} B_z$, определить параметры, характеризующие в каждом случае величину $\nabla_{\perp} B_z$ и исследовать динамику выбранных параметров на статистически значимой выборке АО.

2. *Данные наблюдений.* Работа выполнена на магнитографических данных инструмента HMI/SDO, доступных на сайте Joint Science Operation Center (JSOC). Пространственное разрешение инструмента, как отмечено выше, - $0''.5$ (порядка 360 км на уровне солнечной фотосферы), временное

разрешение в зависимости от типа данных - 45 или 720 с. Здесь использованы SHARP (Spaceweather HMI Active Region Patch) [32] магнитограммы пространственного распределения вертикальной компоненты B_z вектора магнитного поля в фотосфере (цилиндрические координаты, серия данных hmi.sharp_sea_720s) с временным разрешением 720 с.

Дополнительно использованы данные спутника мониторинга погоды GOES-15 о потоке рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 1-8 Å на орбите Земли (доступны по адресу <https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/full>), информация о наиболее мощных вспышках, зафиксированных в анализируемых областях, доступная на интернет-ресурсе https://www.lmsal.com/solarsoft/latest_events_archive.html.

Для анализа отобраны 75 АО 24-го цикла солнечной активности. Основные критерии отбора областей следующие: 1) АО должна быть изолирована от других областей (т.е., на SHARP-магнитограмме должна присутствовать только одна область с уникальным NOAA идентификатором); 2) область должна быть достаточно развита, имея суммарный беззнаковый магнитный поток не ниже $5 \cdot 10^{21}$ Мкс, а также иметь хотя бы одно пятно с максимальной абсолютной напряженностью магнитного поля за все время мониторинга АО не ниже 1600 Гс. По эволюционному статусу, уровню вспышечной продуктивности и иным критериям области не ограничивались.

Краткая информация об АО исследуемой выборки представлена в табл.1. Во втором столбце указан номер области по NOAA классификации, в третьем - время ее мониторинга. С целью минимизации ошибок в вычислении величины $\nabla_{\perp} B_z$, обусловленных эффектом проекции, мониторинг каждой из анализируемых АО ограничивался временным интервалом нахождения ее в пределах $\pm 35^\circ$ относительно центрального меридиана (3-5 сут). В четвертом столбце указан рентгеновский класс и дата наблюдения наиболее мощной вспышки, зафиксированной в анализируемой области за время ее нахождения на видимом диске Солнца. Обозначение "00.0" в четвертом столбце означает, что в исследуемой АО за все время ее нахождения на видимом диске Солнца вспышек/субвспышек не зафиксировано.

3. Применяемые методы вычисления анализируемых параметров и основные результаты.

3.1. Современный подход к вычислению поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля. Первый подход к вычислению величины $\nabla_{\perp} B_z$ можно назвать современным. Для его реализации необходимы магнитографические данные распределения вертикальной B_z компоненты вектора магнитного поля на заданном уровне солнечной

Таблица 1

БАЗОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДУЕМЫХ АО

№ п/п	Номер области (NOAA)	Время мониторинга АО	Наиболее мощная вспышка
1	2	3	4
1	11092	01.08.2010-15.08.2010	C3.2 01.08.2010
2	11131	06.12.2010-10.12.2010	B5.3 03.12.2010
3	11133	08.12.2010-12.12.2010	C2.3 14.12.2010
4	11158	12.02.2011-15.02.2011	X2.2 15.02.2011
5	11232	05.06.2011-09.06.2011	C1.8 02.06.2011
6	11261	31.07.2011-03.08.2011	M9.3 04.08.2011
7	11263	02.08.2011-05.08.2011	X6.9 09.08.2011
8	11283	04.09.2011-07.09.2011	X2.1 06.09.2011
9	11302	27.09.2011-30.09.2011	X1.9 24.09.2011
10	11305	29.09.2011-02.10.2011	M3.9 02.10.2011
11	11343	11.11.2011-14.11.2011	M1.1 09.11.2011
12	11391	07.01.2012-10.01.2012	C2.2 13.01.2012
13	11420	16.02.2012-20.02.2012	B5.3 27.02.2012
14	11429	07.03.2012-10.03.2012	X5.4 07.03.2012
15	11476	09.05.2012-13.05.2012	M5.7 10.05.2012
16	11515	01.07.2012-05.07.2012	X1.1 06.07.2012
17	11520	10.07.2012-14.07.2012	M2.1 10.07.2012
18	11618	20.11.2012-23.11.2012	M1.6 27.11.2012
19	11711	04.04.2013-07.04.2013	C1.7 03.04.2013
20	11748	18.05.2013-21.05.2013	X1.2 15.05.2013
21	11777	24.06.2013-27.06.2013	M2.9 21.06.2013
22	11823	19.08.2013-22.08.2013	C1.4 23.08.2013
23	11836	31.08.2013-04.09.2013	C8.3 30.08.2013
24	11861	11.10.2013-14.10.2013	C8.5 18.10.2013
25	11872	19.10.2013-22.10.2013	00.0
26	11875	21.10.2013-24.10.2013	X1.0 28.10.2013
27	11890	07.11.2013-10.11.2013	X3.3 05.11.2013
28	11899	17.11.2013-20.11.2013	M1.1 23.11.2013
29	11936	27.12.2013-30.12.2013	M9.9 01.01.2014
30	11944	06.01.2014-09.01.2014	X1.2 07.01.2014
31	11949	12.01.2014-16.01.2014	C1.3 14.01.2014
32	11968	01.02.2014-05.02.2014	M3.8 04.02.2014
33	11974	10.02.2014-13.02.2014	M3.7 12.02.2014
34	11991	02.03.2014-05.03.2014	M1.1 28.02.2014
35	12002	12.03.2014-15.03.2014	M1.7 10.03.2014
36	12014	24.03.2014-27.03.2014	M1.7 20.03.2014
37	12061	15.05.2014-18.05.2014	C2.1 26.05.2014
38	12075	27.05.2014-31.05.2014	00.0
39	12090	15.06.2014-18.06.2014	00.0
40	12109	07.07.2014-10.07.2014	C6.5 13.07.2014

Таблица 1 (Окончание)

1	2	3	4
41	12121	26.07.2014-29.07.2014	C2.2 25.07.2014
42	12149	26.08.2014-29.08.2014	M1.2 22.08.2014
43	12158	09.09.2014-12.09.2014	X1.6 10.09.2014
44	12192	22.10.2014-25.10.2014	X3.1 24.10.2014
45	12205	08.11.2014-12.11.2014	X1.6 07.11.2014
46	12222	30.11.2014-04.12.2014	M1.8 01.12.2014
47	12236	15.12.2014-19.12.2014	C2.8 12.12.2014
48	12253	03.01.2015-06.01.2015	M1.3 04.01.2015
49	12261	13.01.2015-17.01.2015	00.0
50	12268	27.01.2015-30.01.2015	M2.1 29.01.2015
21	12297	11.03.2015-14.03.2015	X2.2 11.03.2015
52	12305	25.03.2015-29.03.2015	C8.7 25.03.2015
53	12320	06.04.2015-09.04.2015	M1.4 08.04.2015
54	12339	10.05.2015-13.05.2015	M1.9 06.05.2015
55	12348	17.05.2015-21.05.2015	00.0
56	12367	15.06.2015-19.06.2015	M3.8 21.06.2015
57	12371	20.06.2015-23.06.2015	M7.9 25.06.2015
58	12381	07.07.2015-10.07.2015	M1.7 06.07.2015
59	12396	06.08.2015-09.08.2015	C5.4 07.08.2015
60	12403	22.08.2015-25.08.2015	M5.6 24.08.2015
61	12421	23.09.2015-27.09.2015	C9.4 27.09.2015
62	12443	02.11.2015-05.11.2015	M3.7 04.11.2015
63	12470	17.12.2015-21.12.2015	C4.6 18.12.2015
64	12473	25.12.2015-30.12.2015	M4.7 23.12.2015
65	12480	10.01.2016-14.01.2016	C1.7 15.01.2016
66	12494	05.02.2016-07.02.2016	C5.2 04.02.2016
67	12529	12.04.2016-16.04.2016	M6.7 18.04.2016
68	12544	13.05.2016-16.05.2016	C3.4 15.05.2016
69	12615	02.12.2016-05.12.2016	M1.2 29.11.2016
70	12644	27.03.2017-30.03.2017	M5.8 03.04.2017
71	12673	02.09.2017-05.09.2017	X9.3 06.09.2017
72	12674	03.09.2017-06.09.2017	C5.2 30.08.2017
73	12680	14.09.2017-17.09.2017	C3.0 12.09.2017
74	12699	09.02.2018-12.02.2018	C8.1 07.02.2018
75	12741	11.05.2019-14.05.2019	C2.0 15.05.2019

атмосферы высокого пространственного разрешения. Для расчета величины $\nabla_{\perp} B_z$ используется формула:

$$\nabla_{\perp} B_z = \sqrt{\left(\frac{\partial B_z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial B_z}{\partial y}\right)^2}. \quad (1)$$

Производные $\partial B_z / \partial x$ и $\partial B_z / \partial y$ рассчитаны с применением формул приближенного вычисления. Здесь использована формула вычисления произ-

водной по пяти точкам (пикселям на магнитограмме):

$$f'(x_0) = \frac{-f(x_0 + 2h) + 8f(x_0 + h) - 8f(x_0 - h) + f(x_0 - 2h)}{12h}, \quad (2)$$

где x_0 - пиксел, в котором необходимо вычислить значение производной, h - шаг дифференцирования, равный в нашем случае пространственному разрешению инструмента HMI/SDO. Величина градиента магнитного поля вычислена в единицах Гс км⁻¹. Выбор окна дифференцирования в пять точек обусловлен тем, что при дифференцировании по меньшему количеству точек, получаемые результаты будут сильно зашумлены, а дифференцирование по большему количеству точек приведет к потере части значимой информации.

Реализация первого подхода позволяет построить детализированную карту распределения величины $\nabla_{\perp} B_z$ на заданном уровне солнечной атмосферы. Пример подобной карты, вычисленный на основании данных о пространственном распределении на уровне фотосферы Солнца B_z -компоненты вектора магнитного поля, представлен на рис.1. Жирной белой кривой на рисунке обозначены границы АО (маска bitmap, поставляемая с пакетом магнитографических данных инструмента HMI/SDO) на прямоугольной SHARP-магнитограмме. Параметры, описывающие поперечную составляющую градиента

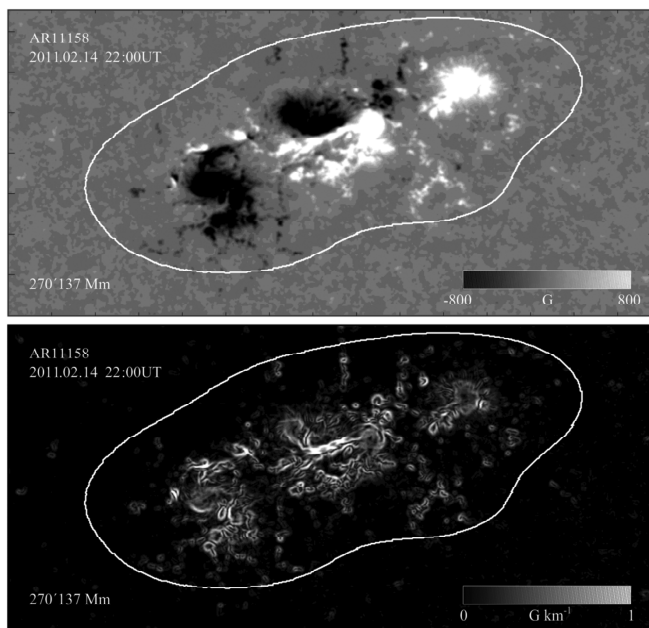


Рис.1. Вверху - магнитограмма вертикальной B_z составляющей вектора магнитного поля области NOAA 11158 анализируемой выборки. Внизу - карта распределения величины $\nabla_{\perp} B_z$, вычисленная с применением современного подхода. Жирной белой кривой обозначены границы АО.

продольного магнитного поля, вычислялись только в пикселях, лежащих внутри жирной белой кривой.

В качестве первого параметра, описывающего градиент продольного магнитного поля, была выбрана средняя по АО величина $\nabla_{\perp} B_z$:

$$\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle = \frac{(\sum \nabla_{\perp} B_z)_{i,j,bitmap}}{N_{bitmap}}, \quad (3)$$

где числитель дроби представляет собой сумму значений величины $\nabla_{\perp} B_z$ в каждом пикселе внутри маски bitmap, а знаменатель содержит общее количество пикселей в маске.

Параметр $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ вычислен для каждой АО анализируемой выборки и для каждой магнитограммы за время мониторинга области. Временные изменения величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ сопоставлены в каждом случае с динамикой вспышечной продуктивности АО. Несколько типичных графиков временных вариаций величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ представлены на рис.2 и рис.3. На рис.2 показана динамика параметра $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ для трех АО с низкой активностью, на рис.3 - для трех областей с высокой активностью. Также на графиках показана динамика суммарного беззнакового магнитного потока (серая двойная кривая) и данные космического аппарата GOES-15 о потоке рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 1-8 Å на орбите Земли (тонкая черная кривая). Указаны рентгеновские классы наиболее мощных вспышек (рентгеновского класса M1.0 и выше), ассоциированных с исследуемой АО за время ее мониторинга.

Из графиков представленных на рис.2 и рис.3 видно, что величина $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ мало различается для областей с низкой и высокой активностью. Объяснить это можно тем, что параметр $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ является зависимым от площади АО (см. выражение (3)).

Еще одним параметром, который может характеризовать поперечную составляющую градиента продольного магнитного поля, является ее максимальное значение. Однако к данной характеристике нужно относиться крайне осторожно: учитывая, что шаг дифференцирования составляет порядка 360 км (пространственное разрешение HMI/SDO), в отдельных случаях максимальное значение величины $\nabla_{\perp} B_z$ может находиться в пространстве между двумя соседними пикселями с близкими значениями величины поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля. Учитывая данное обстоятельство, было принято решение сделать параметром, описывающим поперечную составляющую градиента продольного магнитного поля не максимальное значение градиента, а среднюю величину градиента продольного магнитного поля пикселей, окружающих пиксел с максимальным значением величины $\nabla_{\perp} B_z$:

$$\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle = \frac{1}{9} \left(\nabla_{\perp} B_z^{x-1,y+1} + \nabla_{\perp} B_z^{x,y+1} + \nabla_{\perp} B_z^{x+1,y+1} + \nabla_{\perp} B_z^{x-1,y} + \nabla_{\perp} B_z^{x,y} + \nabla_{\perp} B_z^{x+1,y} + \nabla_{\perp} B_z^{x+1,y-1} + \nabla_{\perp} B_z^{x,y-1} + \nabla_{\perp} B_z^{x-1,y-1} + \nabla_{\perp} B_z^{x,y-1} + \nabla_{\perp} B_z^{x+1,y-1} \right), \quad (4)$$

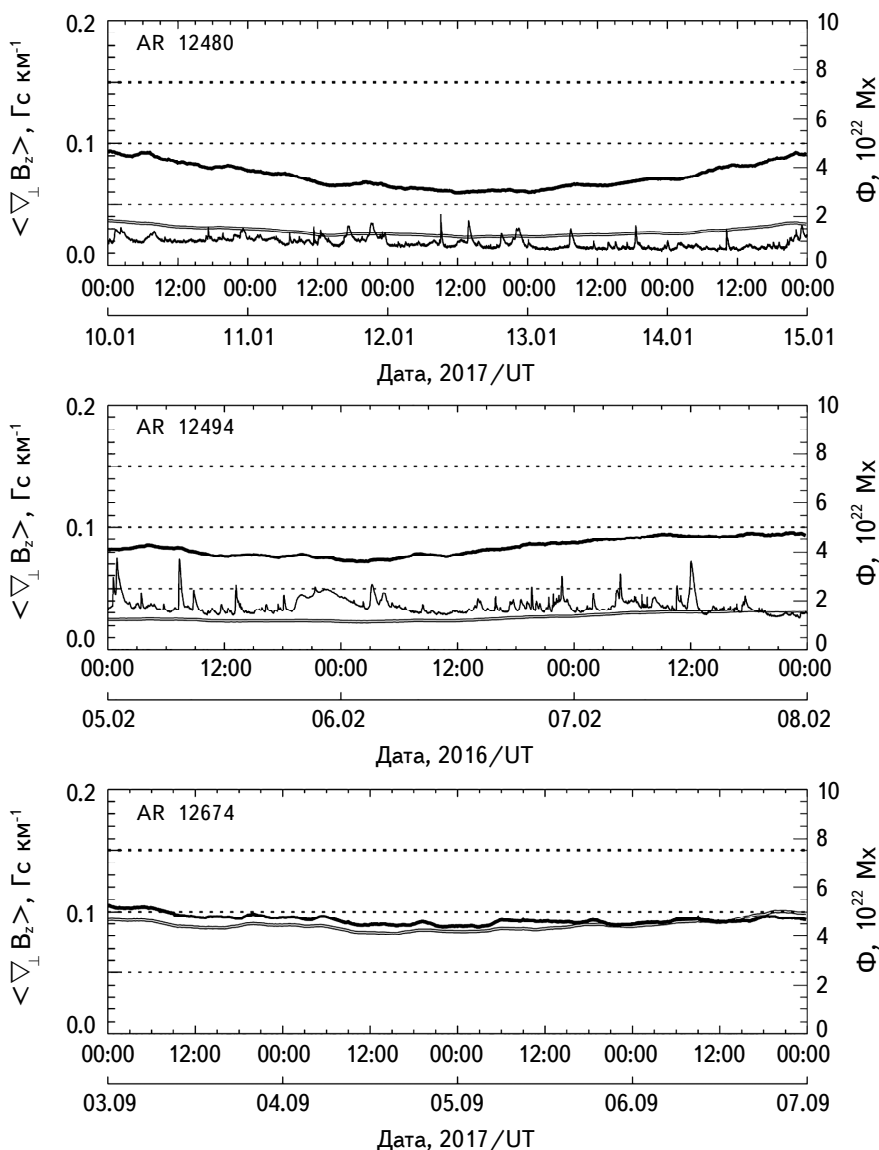


Рис.2. Динамика величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ (черная жирная кривая) для областей NOAA 12480, 12494 и 12674 анализируемой выборки с низкой вспышечной активностью. Серой двойной кривой показаны временные вариации суммарного беззнакового магнитного потока области, тонкой черной кривой - поток рентгеновского излучения Солнца в диапазоне длин волн 1-8 Å на орбите Земли (по данным космического аппарата GOES-15). Горизонтальные штриховые линии разной интенсивности обозначают уровень рентгеновского излучения, соответствующий вспышке рентгеновского класса C1.0 (нижняя), M1.0 (средняя), X1.0 (верхняя).

где x, y - координаты пиксела с максимальным значением величины $\nabla_{\perp} B_z$.

Величина $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle$ вычислена для каждой АО анализируемой выборки и для каждой магнитограммы за время мониторинга области. Временные изменения параметра $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle$ сопоставлены в каждом случае с динамикой вспышечной продуктивности АО. Типичные графики временных вариаций параметра $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle$ для трех областей анализируемой выборки с низкой

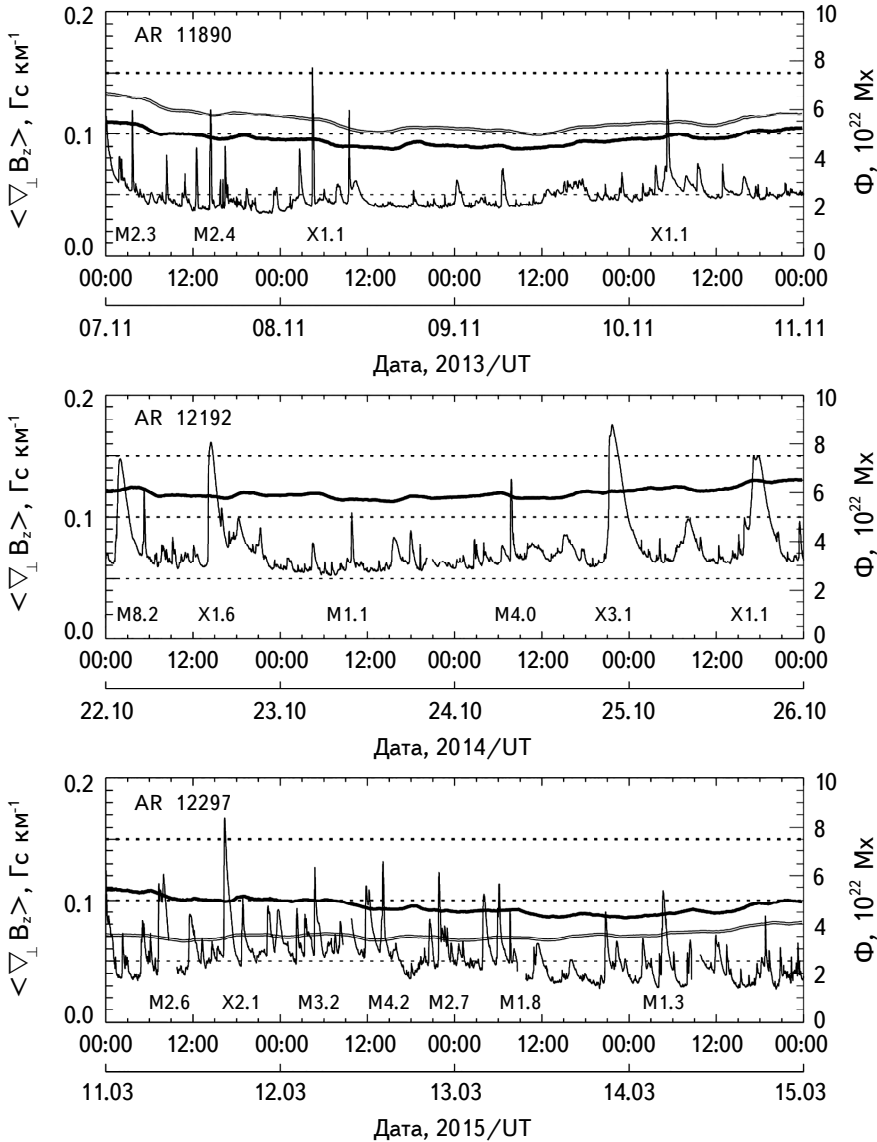


Рис.3. То же, что и на рис.2, но для областей NOAA 11890, 12192 и 12297 анализируемой выборки с высокой вспышечной продуктивностью. В каждом случае указаны рентгеновские классы наиболее мощных вспышек, ассоциированных с исследуемой АО.

активностью представлены на рис.4, для трех областей с высокой активностью - на рис.5. На графиках показана динамика суммарного беззнакового магнитного потока (серая двойная кривая) и данные космического аппарата GOES-15 о потоке рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 1-8 Å на орбите Земли (тонкая черная кривая). Указаны рентгеновские классы

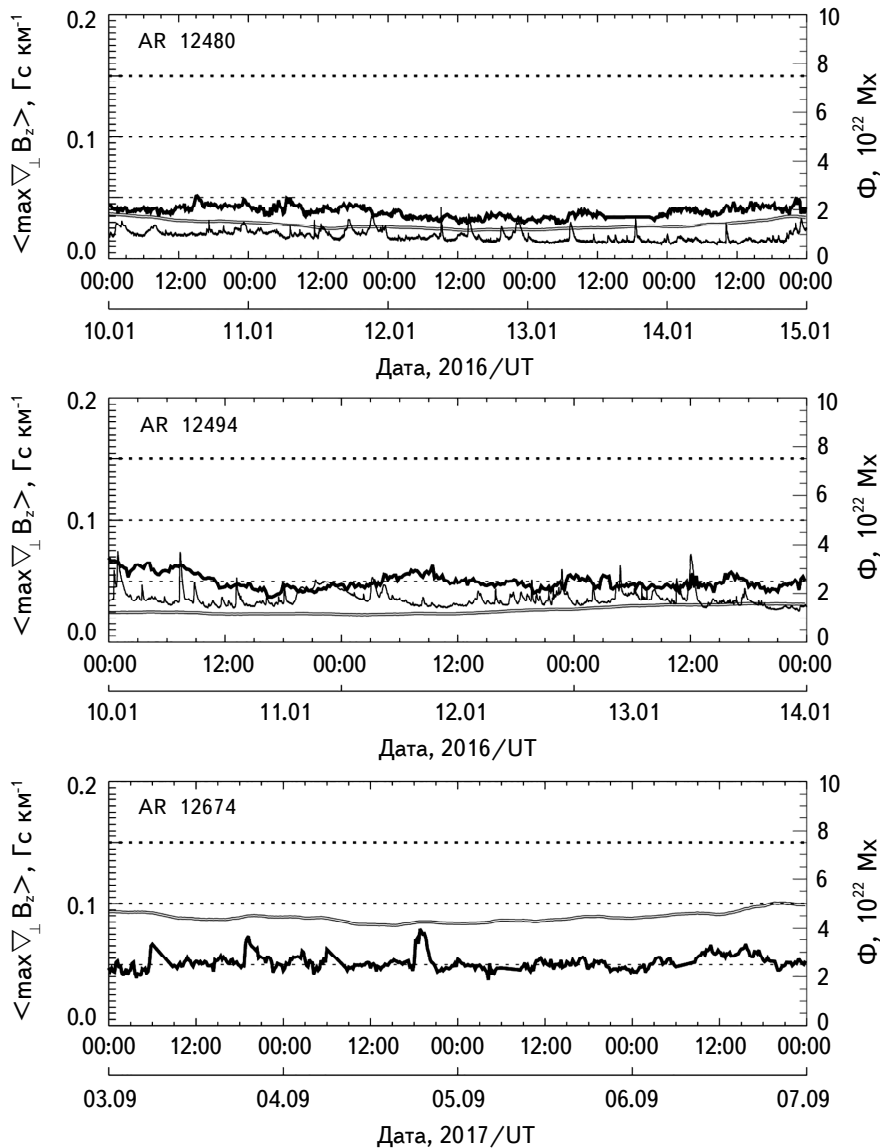


Рис.4. Динамика величины $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle$ (черная жирная кривая) для областей NOAA 12480, 12494 и 12674 анализируемой выборки с низкой вспышечной активностью. Остальные обозначения те же, что и на рис.2.

наиболее мощных вспышек (рентгеновского класса M1.0 и выше), ассоциированных с исследуемой АО за время ее мониторинга.

Как следует из графиков, представленных на рис.4 и рис.5, величина $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle$ является более информативной, чем $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$. Действительно, в подавляющем большинстве рассмотренных случаев, в областях с высокой вспышечной активностью этот параметр имеет более высокие значения и

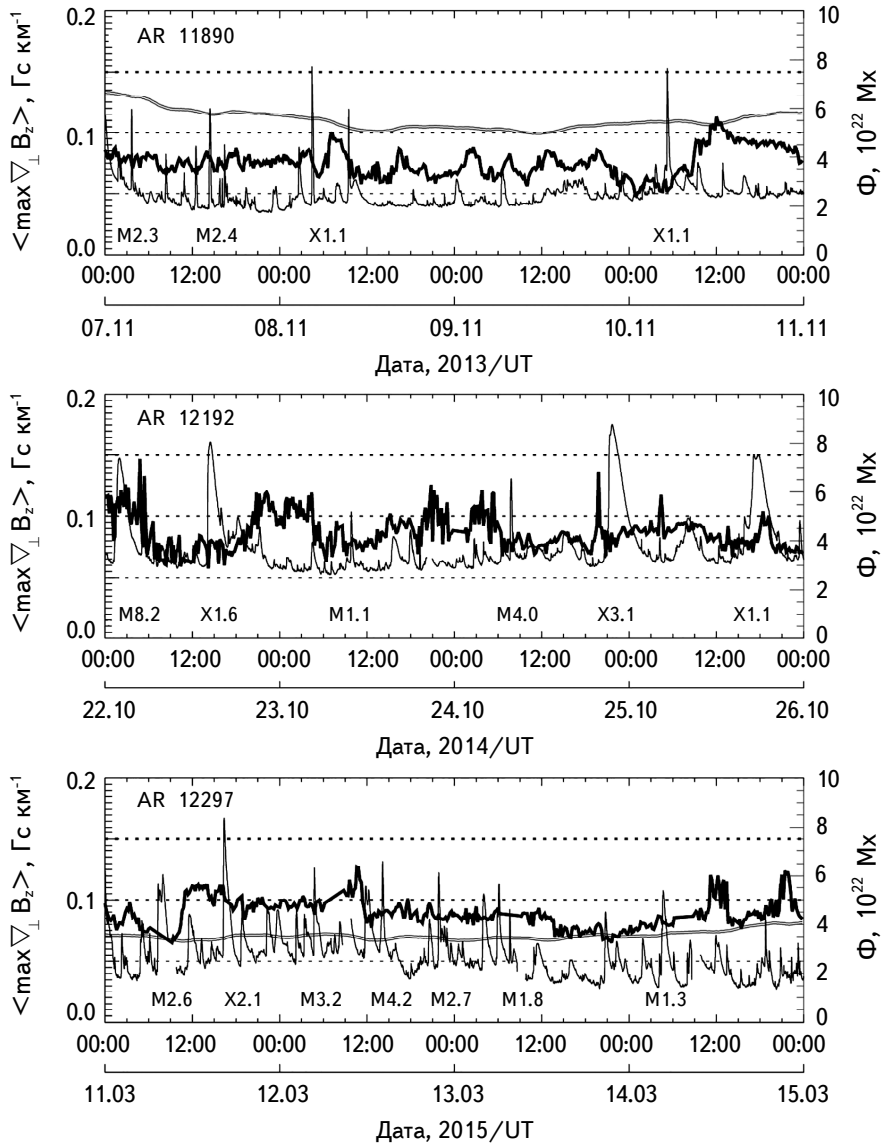


Рис.5. То же, что и на рис.4, но для областей NOAA 11890, 12192 и 12297 анализируемой выборки с высокой вспышечной продуктивностью. В каждом случае указаны рентгеновские классы наиболее мощных вспышек, ассоциированных с исследуемой АО.

претерпевает более существенные временные вариации, чем в областях с низкой активностью.

3.2. Классический подход к вычислению поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля. Второй подход к вычислению величины $\nabla_{\perp} B_z$ - классический. Поскольку магнитографы ранних моделей имели существенно более низкое пространственное разрешение, чем современные инструменты подобного класса, построить детализированные карты пространственного распределения поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля было невозможно. В таких условиях величина $\nabla_{\perp} B_z$ вычисляется между парами пятен в АО (холмами магнитного поля) как абсолютное значение разности максимальных (минимальных) значений напряженности магнитного поля в пятнах B_{zimax} , B_{zjmax} , разделенное на расстояние между точками с максимальными (минимальными) напряженностями магнитного поля в этих пятнах $r \equiv \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$:

$$\nabla_{\perp} B_z = \frac{|B_{zimax} - B_{zjmax}|}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}. \quad (5)$$

Пусть имеется некая АО, в которой можно выделить несколько пятен с сильными магнитными полями (рис.6). Магнитное поле в пятне подразумевается сильным, если максимальная его напряженность (абсолютное значение) превышает 1600 Гс. Это значение получено следующим образом: отсекаются магнитные поля, которые ниже удвоенного значения магнитного поля, типичного для полутени развитого пятна (± 800 Гс). Можно было бы поступить иначе: отсечь магнитные поля с абсолютным значением ниже 1000 Гс (минимальное магнитное поле в развитом пятне). В таком случае, помимо основных пятен, занимающих значительную площадь, мы получили бы и большое количество мелких структур. Затем потребовалось бы отсечь мелкие пятна, площадь которых меньше некоторого порога в n пикселей. Однако в данном случае сразу же возникает вопрос о том, какое минимальное количество пикселей должно занимать пятно, чтобы возникла необходимость его учета при вычислении градиента магнитного поля и как аргументировать именно этот порог.

Выделив отдельные пятна в АО, далее непосредственно приступаем к вычислению градиентов между каждой парой пятен, используя выражение (5). Изначально рассчитываем градиенты продольного магнитного поля между первым пятном и последующими (черные стрелки на верхней панели рис.6), далее - между вторым пятном и последующими (темно-серые стрелки на верхней панели рис.6) и т.д. Очевидно также, что $\nabla_{\perp} B_z(1 \rightarrow 2) \equiv \nabla_{\perp} B_z(2 \rightarrow 1)$, $\nabla_{\perp} B_z(1 \rightarrow 3) \equiv \nabla_{\perp} B_z(3 \rightarrow 1)$ и т.д. Поэтому величина поперечной составля-

шей градиента магнитного поля между пятнами в таких случаях рассчитывалась только один раз.

Получив для магнитограммы исследуемой АО значения величин $\nabla_{\perp} B_z$ для всех пар пятен, из совокупности значений величины $\nabla_{\perp} B_z$ выбирается максимальное (обозначим его как $\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}$) для данного момента времени. Параметр $\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}$ вычисляется для каждой АО анализируемой выборки за весь временной интервал ее мониторинга. Далее строится график временных вариаций величины $\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}$. Примеры таких графиков представлены на рис.7 (для трех областей анализируемой выборки с низкой активностью) и рис.8 (для трех областей с высокой активностью). Также показан поток рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 1-8 Å на орбите Земли (черная тонкая кривая, данные космического аппарата GOES-15). Указаны рентгеновские классы наиболее мощных вспышек (рентгеновского класса не

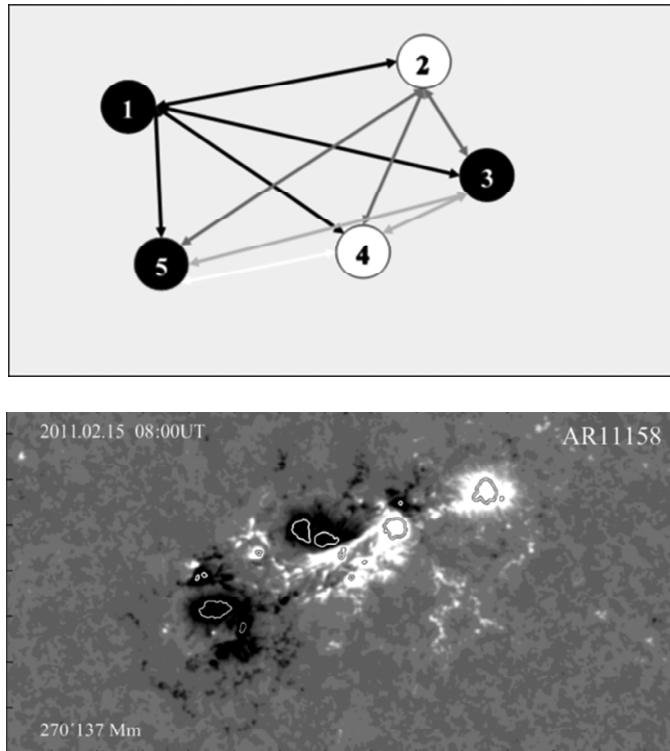


Рис.6. Вверху - схема работы IDL-кода, позволяющего вычислять поперечную компоненту градиента продольного магнитного поля между парами пятен (холмами магнитного поля) в АО, применяя классический подход к вычислению градиента магнитного поля (более детально см. текст). Внизу - результат работы IDL-кода по выделению холмов магнитного поля на примере магнитограммы области NOAA 11158 на момент времени 08:00UT 15 февраля 2011г. Светлыми контурами на карте обозначены области с абсолютной напряженностью магнитного поля выше 1600 Гс.

ниже M1.0), ассоциированных с исследуемой АО за время ее мониторинга.

Анализируя графики, представленные на рис.7 и рис.8, можно сказать следующее:

1) Величина $\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}$ в областях с низкой активностью меньше, чем в областях с высокой вспышечной активностью.

2) Динамика величины $\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}$ в большинстве рассмотренных случаев больше в областях с высокой активностью. На графиках рис.8 можно заметить весьма существенные скачки величины $\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}$, которые, вероятно, обусловлены эволюцией магнитного поля в АО. Подобные изменения могут быть связаны либо с распадом одного из двух пятен, между которыми программа ранее определяла максимальное значение градиента магнитного поля, и, соответственно, переход на иную пару пятен (в этом случае наблюдается скачкообразное уменьшение величины $\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}$ на графике), или же всплытием нового магнитного потока с достаточно высокой напряженностью магнитного поля вблизи одного из пятен (в таком случае наблюдается скачкообразное нарастание величины $\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}$).

Крайне интересным стало обнаружение для области NOAA 11283 (см. рис.8) временной задержки в 19ч между стабильным нарастанием величины $\max(\nabla_{\perp} B_z)$ и началом развития вспышки рентгеновского класса M5.3, первой из серии мощных вспышечных процессов. В предыдущей работе [31] близкие результаты были получены также для областей NOAA 11158 и 12673 (здесь временная задержка составляла 23-25ч). Этот результат также хорошо согласуется с данными, полученными при изучении локальных вертикальных электрических токов [33]. Таким образом, можно сделать вывод о характерном времени порядка 18-20 ч, которое, вероятно, необходимо для накопления энергии непотенциальных магнитных полей и ее передачи в верхние слои солнечной атмосферы. Полученный результат может быть использован как предиктор роста вспышечной активности АО в краткосрочном (с заблаговременностью порядка суток) прогнозе космической погоды.

4. Выводы и обсуждение. На статистически значимой выборке из 75 АО 24-го цикла солнечной активности, обладающих разным уровнем вспышечной продуктивности, определены параметры, характеризующие величину поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля $\nabla_{\perp} B_z$, изучена их динамика за время мониторинга АО. Получены следующие результаты:

1. Средняя по АО величина $\nabla_{\perp} B_z$ и ее динамика мало различается для областей с низкой и высокой активностью: для подавляющего большинства областей анализируемой выборки данный параметр находится в диапазоне значений 0.08-0.12 Гс км⁻¹. Полученный результат можно объяснить

зависимостью величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ от площади АО.

2. Средняя величина $\nabla_{\perp} B_z$ в окрестности его максимального значения $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle$ и ее динамика в подавляющем большинстве рассмотренных случаев больше в областях с более высоким уровнем вспышечной продуктивности.

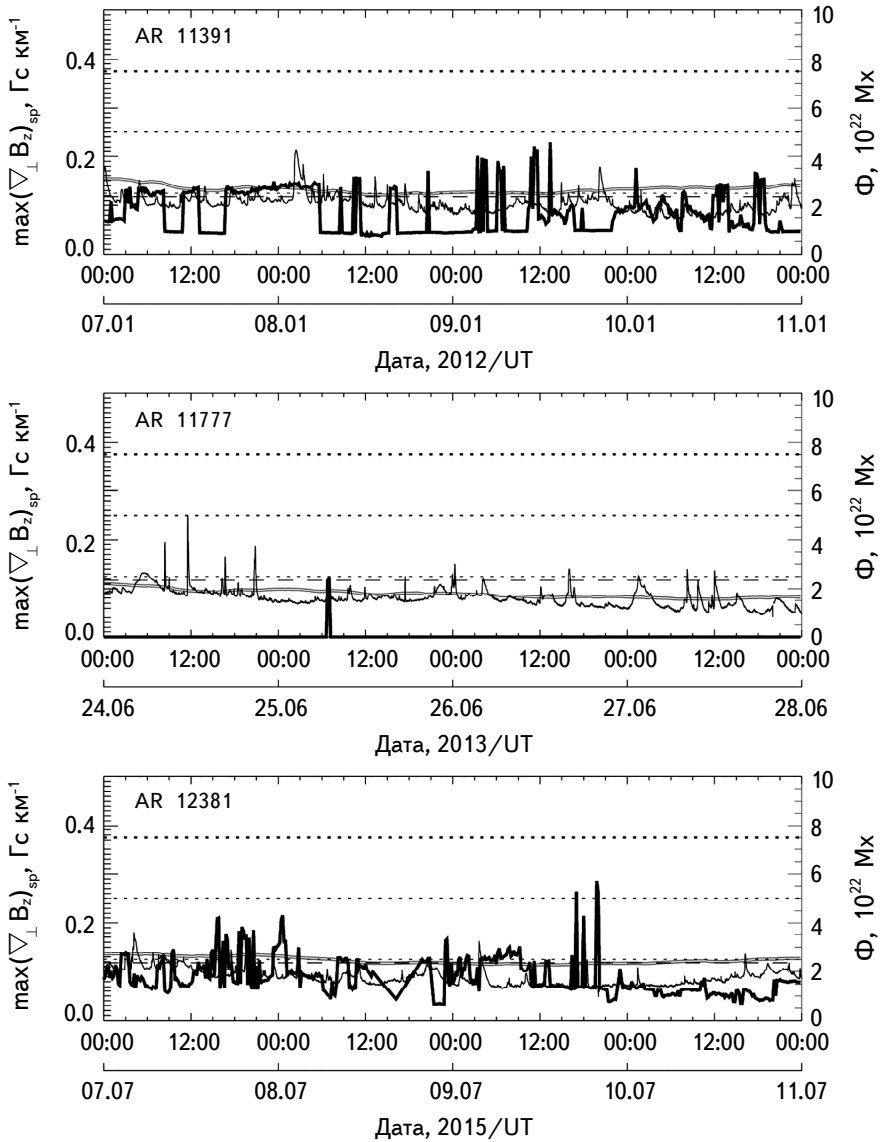


Рис.7. Динамика величины $\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}$ (черная жирная кривая) для областей NOAA 11391, 11777 и 12381 анализируемой выборки с низкой вспышечной активностью. Остальные обозначения те же, что и на рис.2.

3. Численные значения величины $\nabla_{\perp} B_z$ между пятнами $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle_{sp}$ и ее динамика в подавляющем числе рассмотренных случаев больше в областях с более высоким уровнем вспышечной продуктивности.

4. В области NOAA 11283 изучение динамики параметра $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle_{sp}$

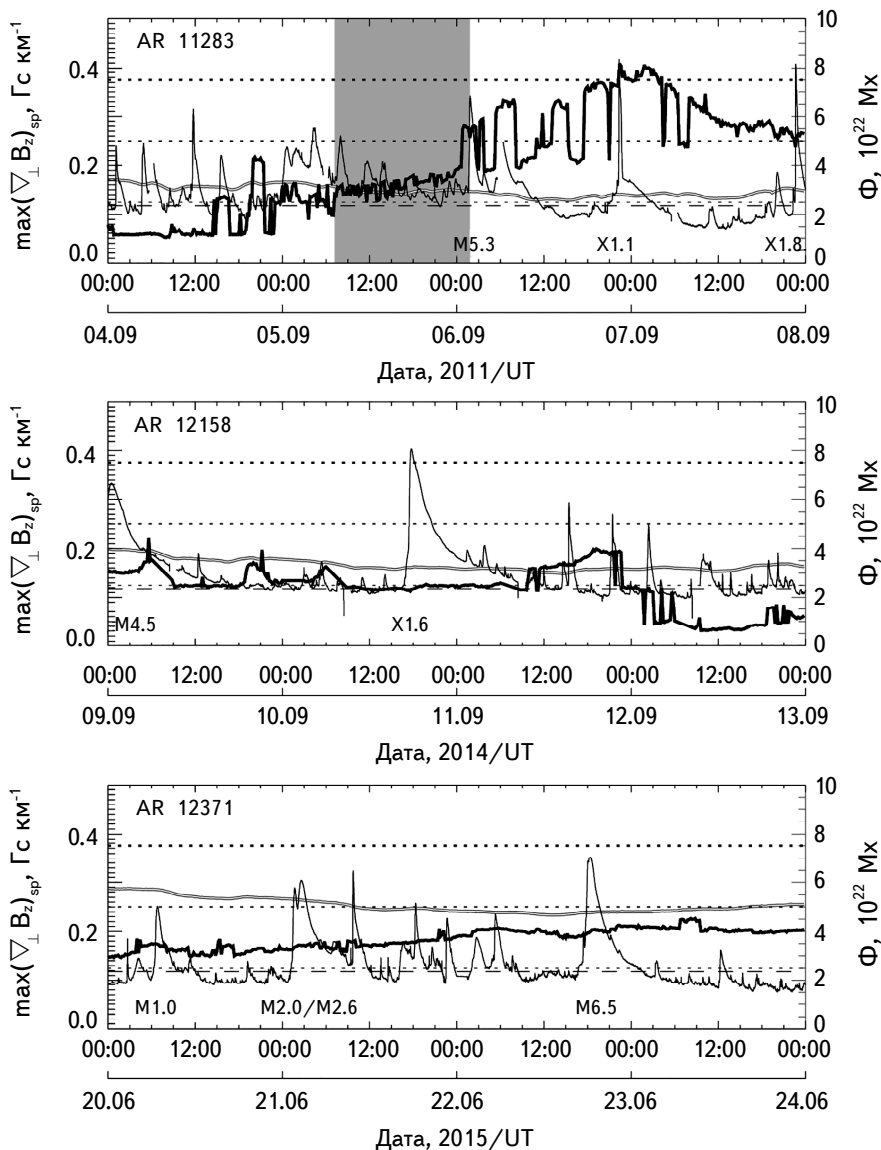


Рис.8. То же, что и на рис.7, но для областей NOAA 11283, 12158 и 12371 анализируемой выборки с высокой вспышечной продуктивностью. В каждом случае указаны рентгеновские классы наиболее мощных вспышек, ассоциированных с исследуемой АО. Для области NOAA 11283 интервал стабильного нарастания величины $\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}$ отмечен на графике серым цветом.

позволило обнаружить временную задержку порядка 19ч между стабильным нарастанием величины $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle_{sp}$ и началом развития первой (рентгеновский класс M5.3) из серии мощных вспышек.

Автор признателен коллегам по исследовательской группе, сотрудникам Отдела физики Солнца и солнечной системы КРАО РАН В.И.Абраменко, А.С.Куценко, О.К.Куценко, А.В.Жуковой, А.А.Плотникову, Р.А.Сулеймановой и Д.В.Литвишко за обсуждение результатов, полученных в работе. Автор благодарит рецензента за проявленный к работе интерес. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (НИР №1021051101548-7-1.3.8).

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Республика Крым,
Россия, e-mail: yuriy_fursyak@mail.ru

TRANSVERSE GRADIENTS OF A LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD IN ACTIVE REGIONS WITH DIFFERENT LEVEL OF FLARE PRODUCTIVITY. I. CALCULATION METHODS AND DYNAMICS OF SELECTED PARAMETERS

Yu.A.FURSYAK

The aim of this work is to study the dynamics of parameters describing the transverse component of the longitudinal magnetic field gradient $\nabla_{\perp} B_z$ in active regions (ARs) with different levels of flare productivity. The data obtained by the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) instrument onboard the Solar Dynamics Observatory (SDO) was used to analyse 75 ARs of the 24th cycle of solar activity. To calculate the value of $\nabla_{\perp} B_z$, two approaches are applied - modern and classical. In each case, the parameters describing the quantity $\nabla_{\perp} B_z$ in the AO are determined. For the modern approach, these are the $\nabla_{\perp} B_z$ AR-averaged value $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ and the $\nabla_{\perp} B_z$ average value in the vicinity of the point with its maximum value $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle$, for the classical approach is the maximum value between pairs of spots in the AR $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle_{sp}$. The dynamics of the selected parameters during the monitoring time of each of the ARs of the analyzed sample was studied. It is shown that: 1. The scatter of $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ values is small (for the vast majority of the studied ARs it is within 0.08-0.12 G km⁻¹) and differs little for ARs with low and high flare productivity. 2. Numerical values of the parameter $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle$ and its dynamics in the overwhelming majority of cases considered are greater in ARs

with a higher level of flare productivity. 3. The numerical values of the parameter $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle_{sp}$ and its dynamics are greater in ARs with a higher level of flash productivity. 4. In AO NOAA 11283, a stable increase in the value of $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle_{sp}$ was recorded approximately 19 hours before the development of the first of a series of high X-ray classes flares.

Keywords: *Sun: active regions: solar flare activity: magnetic field: magnetic field gradients*

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Б.Северный, Некоторые проблемы физики Солнца, М., Наука, 1988.
2. G.D.Fleishman, A.A.Pevisov, Electric Currents in Geospace and Beyond, 43, 2018.
3. G.E.Hale, Astrophys. J., **28**, 315, 1908.
4. H.W.Babcock, Astrophys. J., **118**, 387, 1953.
5. Н.С.Никулин, А.Б.Северный, В.Е.Степанов, Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв., **19**, 3, 1958.
6. Б.А.Иошпа, В.Н.Обридко, Солнечные данные, **3**, 54, 1965.
7. Р.Н.Ихсанов, Ю.П.Платонов, Солнечные данные, **11**, 78, 1967.
8. Д.А.Кузнецов, Г.В.Куклин, В.Е.Степанов, Результаты наблюдений и исследований в период МГСС, **1**, 80, 1966.
9. R.H.Lee, R.M.Rust, H.Zirin, Applied Optics IP, **4**, 1081, 1965.
10. W.C.Livingston, Astrophys. J., **153**, 929, 1968.
11. А.Б.Северный, Астрон. ж., **33**, 74, 1956.
12. А.Б.Северный, Астрон. ж., **34**, 684, 1957.
13. А.В.Брунс, Н.С.Никулин, А.Б.Северный, Изв. Крымск. Астрофиз. Обс., **33**, 80, 1965.
14. Н.С.Никулин, Изв. Крымск. Астрофиз. Обс., **36**, 76, 1967.
15. J.L.Leroy, Ann. Astrophys., **25**, 127, 1962.
16. А.Б.Северный, Изв. Крымск. Астрофиз. Обс., **33**, 3, 1965.
17. Б.А.Иошпа, Э.И.Могилевский, Солн. Активность, **2**, 118, 1965.
18. В.А.Котов, Изв. Крымск. Астрофиз. Обс., **41-42**, 67, 1970.
19. Е.А.Барановский, В.Е.Степанов, Изв. Крымск. Астрофиз. Обс., **21**, 180, 1959.
20. А.Б.Северный, Изв. Крымск. Астрофиз. Обс., **20**, 22, 1958.
21. А.Б.Северный, Изв. Крымск. Астрофиз. Обс., **22**, 12, 1960.
22. С.И.Гопасюк, М.Б.Огирь, А.Б.Северный и др., Изв. Крымск. Астрофиз. Обс., **29**, 15, 1963.
23. А.М.Зверева, А.Б.Северный, Изв. Крымск. Астрофиз. Обс., **41-42**, 97, 1970.

24. *Y.Avignon, M.J.Martres, M.Pick*, Ann. Astrophys., **27**, 23, 1964.
25. *C.Caroubalos*, Ann. Astrophys., **27**, 333, 1964.
26. *A.B.Severyny, N.N.Stepanyan, N.V.Steshenko*, NOAA Solar-Terrest. Prediction Proc., **1**, 72, 1979.
27. *А.Т.Алтынцева, В.Г.Банин, Г.В.Куклин и др.*, Солнечные вспышки, М., Наука, 1982.
28. *P.H.Scherrer, J.Schou, R.I.Bush et al.*, Solar Phys., **275**, 207, 2012.
29. *W.D.Pesnell, B.J.Thompson, P.C.Chamberlin*, Solar Phys., **275**, 3, 2012.
30. *T.Kosugi, K.Matsuzaki, T.Sakao et al.*, Solar Phys., **243**, 3, 2007.
31. *Ю.А.Фурсяк*, Изв. Крымск. Астрофиз. Обс., **118**, 39, 2022.
32. *M.B.Bobra, X.Sun, J.T.Hoeksema et al.*, Solar Phys., **289**, 3549, 2014.
33. *Yu.A.Fursyak, V.I.Abramenko, A.S.Kutsenko*, Astrophysics, **63**, 260, 2020.