

ПОПЕРЕЧНЫЕ ГРАДИЕНТЫ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ С РАЗНЫМ УРОВНЕМ ВСПЫШЕЧНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ. II. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Ю.А.ФУРСЯК

Поступила 20 июля 2023

Принята к печати 7 марта 2024

Работа является частью исследования, посвященного изучению градиентов продольного магнитного поля в активных областях (АО) с разным уровнем вспышечной продуктивности. Выполнен статистический анализ параметров, описывающих поперечную составляющую градиента продольного магнитного поля $\nabla_{\perp} B_z$ в АО: средней по области величины поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$, средней величины $\nabla_{\perp} B_z$ в окрестности точки с максимальным его значением $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle$, максимального значения $\nabla_{\perp} B_z$ между парами пятен в АО $\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}$. Для вычисления обозначенных параметров использованы магнитограммы B_z -компоненты вектора магнитного поля на уровне фотосферы Солнца, получаемые инструментом Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) на борту Solar Dynamics Observatory (SDO). Статистическая выборка содержит в себе данные о 75 АО. Усредненные за время мониторинга величины анализируемых параметров сопоставлены с уровнем вспышечной продуктивности АО (вспышечным индексом, FI). Показано, что: 1. Зависимость $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ - FI (чертой сверху обозначено усреднение по времени мониторинга АО) квадратичная с коэффициентом корреляции $k=0.54$, а 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 крайне мало различается для областей с низкой и высокой вспышечной продуктивностью, что можно объяснить зависимостью величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ от площади АО. 2. Зависимость $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle$ - FI квазилинейная с коэффициентом корреляции $k=0.61$. 3. Зависимость $\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}$ - FI линейная с коэффициентом корреляции $k=0.63$. 4. Выявлены пороговые значения анализируемых параметров: для величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle \geq 0.078$ Гс км⁻¹, для величины $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle \geq 0.983$ Гс км⁻¹, для параметра $\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp} \geq 0.118$ Гс км⁻¹. При более низких значениях анализируемых параметров ни в одной из областей выборки вспышек рентгеновских классов X не фиксировалось.

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

1. *Введение.* Данная работа является составной частью более крупного исследования, посвященного изучению градиентов продольного магнитного поля в активных областях (АО) с разным уровнем вспышечной продуктивности и логическим продолжением работы, результаты которой опубликованы в

первой части статьи [1].

В 2022г. автором были получены предварительные результаты: на небольшой выборке из 13 АО были определены параметры, которые характеризовали величину поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля $\nabla_{\perp} B_z$, изучена их динамика на временном интервале мониторинга АО, получены критические (пороговые) значения этих параметров [2]. Здесь автор ставит перед собой задачу на существенно большем статистическом материале (анализируются 75 АО 24-го цикла солнечной активности) подтвердить либо скорректировать полученные ранее результаты.

2. Данные наблюдений. Работа выполнена с использованием данных инструмента Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) [3], установленного на борту космического аппарата Solar Dynamics Observatory (SDO) [4], которые доступны на сайте Joint Science Operation Center (JSOC) по адресу <http://jsoc2.stanford.edu/ajax/lookdata.html>. Пространственное разрешение инструмента HMI/SDO - 0".5 (≈ 360 км на уровне фотосферы Солнца), временное разрешение используемых данных - 720 с. Использованы SHARP (Spaceweather HMI Active Region Patch) [5] магнитограммы пространственного распределения вертикальной компоненты B_z вектора магнитного поля в фотосфере (цилиндрические координаты, серия данных `hmi.sharp_cea_720s`).

Дополнительно использована информация о типе активной области согласно магнито-морфологической классификации (ММК) АО, разработанной в КрАО [6-8], вспышечном индексе АО (flare index, FI [9]), доступные по адресу <https://sun.crao.ru/databases/catalog-mmcs-ars>, информация о наиболее мощных вспышках, зафиксированных в анализируемых областях (данные взяты с сайта https://www.lmsal.com/solarsoft/latest_events_archive.html). В случае отсутствия в каталоге ММК АО информации о вспышечном индексе, необходимые вычисления осуществлялись автором самостоятельно с использованием данных интернет-ресурса https://www.lmsal.com/solarsoft/latest_events_archive.html.

Для статистического анализа использованы данные тех же 75 АО 24-го цикла солнечной активности, что и в [1].

Основная информация об исследуемых АО представлена в табл.1. Указаны номер области по NOAA классификации (второй столбец таблицы), время ее мониторинга (третий столбец). Четвертый столбец таблицы содержит информацию о типе АО согласно ММК: U1 - одиночные пятна без значимых магнитных образований в окрестности; U2 - пятна с мелкими пятнами/порами разной полярности, сконцентрированными на границах супергрануляционной ячейки или рассеянными вокруг основного пятна; A1 - регулярные (т.е. подчиняющиеся основным закономерностям глобального динамо - закону

Таблица 1

 ПАРАМЕТРЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ТОКОВ В ИССЛЕДУЕМЫХ АО

№	Номер области (NOAA)	Время мониторинга АО	Тип АО по ММК	FI	Площадь АО, $\bar{N}_{AR}$ пикс.	$\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ Гс км ⁻¹	$\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle$ Гс км ⁻¹	$\overline{\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}}$ Гс км ⁻¹
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	11092	01.08.2010-15.08.2010	B1	0.702	136727	0.066	0.756	0.017
2	11131	06.12.2010-10.12.2010	U2	0.145	126776	0.091	0.781	0.001
3	11133	08.12.2010-12.12.2010	U2	0.192	100438	0.068	0.704	0.007
4	11158	12.02.2011-15.02.2011	B2	59.255	98747	0.105	1.296	0.331
5	11232	05.06.2011-09.06.2011	U2	0.368	97435	0.065	0.734	0.001
6	11261	31.07.2011-03.08.2011	B3	28.678	177574	0.096	1.644	0.533
7	11263	02.08.2011-05.08.2011	B2	63.469	113906	0.100	1.424	0.337
8	11283	04.09.2011-07.09.2011	B2	45.605	195992	0.087	1.045	0.206
9	11302	27.09.2011-30.09.2011	A2	78.788	248417	0.090	1.931	1.008
10	11305	29.09.2011-02.10.2011	A1	6.370	116448	0.075	1.119	0.085
11	11343	11.11.2011-14.11.2011	U2	0.733	167175	0.071	0.686	0.016
12	11391	07.01.2012-10.01.2012	A1	0.300	160036	0.090	0.899	0.084
13	11420	16.02.2012-20.02.2012	B1	0.038	65083	0.070	0.677	0.008
14	11429	07.03.2012-10.03.2012	B2	70.892	259881	0.116	1.552	0.482
15	11476	09.05.2012-13.05.2012	B3	30.554	250373	0.114	1.786	0.444
16	11515	01.07.2012-05.07.2012	B2	79.723	218173	0.116	1.561	0.443
17	11520	10.07.2012-14.07.2012	B3	13.383	670758	0.102	1.633	0.296
18	11618	20.11.2012-23.11.2012	B3	6.751	165853	0.093	1.344	0.218
19	11711	04.04.2013-07.04.2013	A1	0.170	272155	0.077	0.776	0.043
20	11748	18.05.2013-21.05.2013	B3	15.976	152667	0.078	1.232	0.495
21	11777	24.06.2013-27.06.2013	U2	2.231	156624	0.067	0.658	0.001
22	11823	19.08.2013-22.08.2013	U2	0.100	128293	0.068	0.795	0.006
23	11836	31.08.2013-04.09.2013	U2	1.288	252750	0.067	0.900	0.049
24	11861	11.10.2013-14.10.2013	B1	6.888	181001	0.084	1.085	0.199
25	11872	19.10.2013-22.10.2013	U2	0.001	34452	0.073	0.756	0.036
26	11875	21.10.2013-24.10.2013	A2	26.823	236139	0.097	1.438	0.471
27	11890	07.11.2013-10.11.2013	A2	55.630	295070	0.096	1.510	0.631
28	11899	17.11.2013-20.11.2013	U2	3.846	389635	0.070	1.401	0.004
29	11936	27.12.2013-30.12.2013	B2	18.500	175148	0.094	1.050	0.138
30	11944	06.01.2014-09.01.2014	B2	34.986	606592	0.089	1.404	0.485
31	11949	12.01.2014-16.01.2014	A1	0.100	195143	0.070	0.786	0.053
32	11968	01.02.2014-05.02.2014	B2	11.756	277975	0.097	1.271	0.128
33	11974	10.02.2014-13.02.2014	B2	22.659	217301	0.099	1.406	0.473
34	11991	02.03.2014-05.03.2014	B2	6.018	132407	0.094	1.350	0.365
35	12002	12.03.2014-15.03.2014	A2	9.575	150461	0.090	1.061	0.173
36	12014	24.03.2014-27.03.2014	B1	4.900	215467	0.084	0.952	0.078
37	12061	15.05.2014-18.05.2014	A1	0.243	98130	0.073	0.715	0.005
38	12075	27.05.2014-31.05.2014	U1	0.001	52558	0.066	0.666	0.001
39	12090	15.06.2014-18.06.2014	A1	0.001	81860	0.074	0.660	0.000
40	12109	07.07.2014-10.07.2014	B1	2.546	170211	0.102	1.042	0.081

Таблица 1 (Окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
41	12121	26.07.2014-29.07.2014	B1	0.480	189190	0.077	0.812	0.061
42	12149	26.08.2014-29.08.2014	A2	7.022	200521	0.067	0.873	0.058
43	12158	09.09.2014-12.09.2014	B1	12.998	169590	0.095	0.983	0.118
44	12192	22.10.2014-25.10.2014	B3	101.644	642762	0.120	1.733	0.335
45	12205	08.11.2014-12.11.2014	B2	47.154	237053	0.091	1.626	0.554
46	12222	30.11.2014-04.12.2014	A2	10.654	203536	0.100	1.107	0.112
47	12236	15.12.2014-19.12.2014	U1	0.200	103247	0.091	0.766	0.014
48	12253	03.01.2015-06.01.2015	A2	7.830	222371	0.095	1.306	0.186
49	12261	13.01.2015-17.01.2015	U1	0.001	498842	0.080	0.958	0.097
50	12268	27.01.2015-30.01.2015	B2	7.607	243552	0.086	1.046	0.095
51	12297	11.03.2015-14.03.2015	B3	46.318	201527	0.095	1.784	0.792
52	12305	25.03.2015-29.03.2015	B1	1.327	305399	0.077	1.224	0.114
53	12320	06.04.2015-09.04.2015	B2	6.415	290701	0.078	1.027	0.174
54	12339	10.05.2015-13.05.2015	B2	8.793	338826	0.102	0.996	0.145
55	12348	17.05.2015-21.05.2015	U1	0.001	45014	0.065	0.718	0.031
56	12367	15.06.2015-19.06.2015	A2	11.150	254671	0.099	1.154	0.112
57	12371	20.06.2015-23.06.2015	B1	18.828	200325	0.101	1.178	0.185
58	12381	07.07.2015-10.07.2015	A1	5.253	123153	0.088	1.074	0.088
59	12396	06.08.2015-09.08.2015	A2	2.931	141725	0.113	1.162	0.181
60	12403	22.08.2015-25.08.2015	A2	30.097	267332	0.114	1.617	0.319
61	12421	23.09.2015-27.09.2015	B1	1.736	83931	0.078	0.945	0.061
62	12443	02.11.2015-05.11.2015	B2	11.844	259683	0.098	1.157	0.160
63	12470	17.12.2015-21.12.2015	U1	0.644	257603	0.083	0.824	0.068
64	12473	25.12.2015-30.12.2015	B2	9.019	172338	0.108	1.168	0.149
65	12480	10.01.2016-14.01.2016	A1	0.232	96851	0.073	0.770	0.013
66	12494	05.02.2016-07.02.2016	B1	1.773	71474	0.084	0.989	0.095
67	12529	12.04.2016-16.04.2016	A2	8.102	231350	0.097	1.131	0.071
68	12544	13.05.2016-16.05.2016	A2	1.808	75401	0.093	1.073	0.160
69	12615	02.12.2016-05.12.2016	A2	4.608	93638	0.088	1.056	0.089
70	12644	27.03.2017-30.03.2017	A2	19.272	90932	0.090	1.018	0.106
71	12673	02.09.2017-05.09.2017	B3	223.858	103291	0.102	1.490	0.467
72	12674	03.09.2017-06.09.2017	A1	0.757	199944	0.093	1.035	0.112
73	12680	14.09.2017-17.09.2017	U2	0.231	42603	0.061	0.737	0.023
74	12699	09.02.2018-12.02.2018	A1	1.300	96411	0.089	1.086	0.094
75	12741	11.05.2019-14.05.2019	U2	0.154	109790	0.065	0.866	0.056

Хэйла, закону Джоя, правилу доминирования лидирующего пятна) биполярные группы пятен без дельта-структур; A2 - регулярные биполи, содержащие малые (по сравнению с лидирующим пятном) дельта-структуры; B1 - биполярные группы пятен с нарушением хотя бы одной из вышеуказанных закономерностей глобального динамо; B2 - области, состоящие из нескольких одинаково направленных биполей, а также области с доминирующей дельта-структурой; B3 - многополярные АО, состоящие из нескольких приблизительно равноценных

пятен обеих полярностей, расположенных произвольно. Пятый столбец таблицы - вспышечный индекс (FI) - параметр, характеризующий вспышечную продуктивность АО. Согласно [9], вспышечный индекс равен 1.0 (100.0) если в АО ежедневно происходит одна вспышка рентгеновского класса C1.0 (X1.0). Величина FI вычисляется за все время нахождения области на видимом диске Солнца. В шестом столбце содержится информация о площади, занимаемой АО (точнее - о количестве пикселей на SHARP-магнитограмме внутри маски bitmap, поставляемой с магнитографическими данными инструмента HMI/SDO, которая обозначает собственно границы АО). Последние три столбца таблицы содержат информацию о величинах параметров, характеризующих величину $\nabla_{\perp} B_z$ в исследуемых областях - усредненную за время мониторинга (усреднение по времени здесь обозначается чертой сверху) среднюю величину $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ (седьмой столбец), усредненную за время мониторинга среднюю величину в окрестности его максимального значения $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle$ (восьмой столбец) и усредненную за время мониторинга области максимальную величину $\nabla_{\perp} B_z$ между пятнами в АО $\overline{\max(\nabla_{\perp} B_z)}_{sp}$ (девятый столбец). Детально эти параметры проанализированы ниже в разделе 4.

3. *Вычисление анализируемых параметров.* Методы вычисления и применяемые подходы подробно описаны в [1]. Таким образом, здесь применены два подхода к вычислению величины $\nabla_{\perp} B_z$ - современный, требующий магнитографических данных высокого пространственного разрешения и позволяющий строить детализированные карты пространственного распределения величины $\nabla_{\perp} B_z$ на заданном уровне солнечной атмосферы, в рассмотренном здесь случае - на уровне фотосферы Солнца (пример подобной карты см. рис.1 в [1]), и классический, который применялся еще в первых работах, посвященных данной тематике. Вычисления величины $\nabla_{\perp} B_z$ с применением современного подхода выполнены с использованием выражений (1) и (2), классического подхода - с использованием выражения (5), представленных в [1].

В рамках каждого подхода были определены параметры, описывающие величину $\nabla_{\perp} B_z$. Для современного подхода это средняя по АО величина поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ (см. выражение (3) в [1]) и средняя величина $\nabla_{\perp} B_z$ пикселей, окружающих точку с максимальным значением градиента $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle$ (см. выражение (4) в [1]). Для классического подхода параметром, характеризующим величину $\nabla_{\perp} B_z$, был определен максимальный градиент между парами пятен (вернее - между холмами магнитного поля) в АО $\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}$.

4. *Результаты.* Усредненные за время мониторинга АО (см. третий столбец табл.1) величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$, $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle$ и $\overline{\max(\nabla_{\perp} B_z)}_{sp}$ представлены,

соответственно, в седьмом, восьмом и девятом столбцах таблицы, а результаты сопоставления данных параметров со вспышечным индексом АО показаны на графиках рис.1, рис.3 и рис.4.

4.1. *Современный подход к вычислению поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля: статистический анализ и основные результаты.* Зависимость между величинами $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ и FI представлена на рис.1. На верхнем графике здесь и далее на рис.2-4 символами разного цвета отмечены области с разной вспышечной продуктивностью (пустыми кружочками отмечены области, в которых не наблюдалось вспышек рентгеновского класса C1.0 и выше, серыми кружочками - области со вспышками

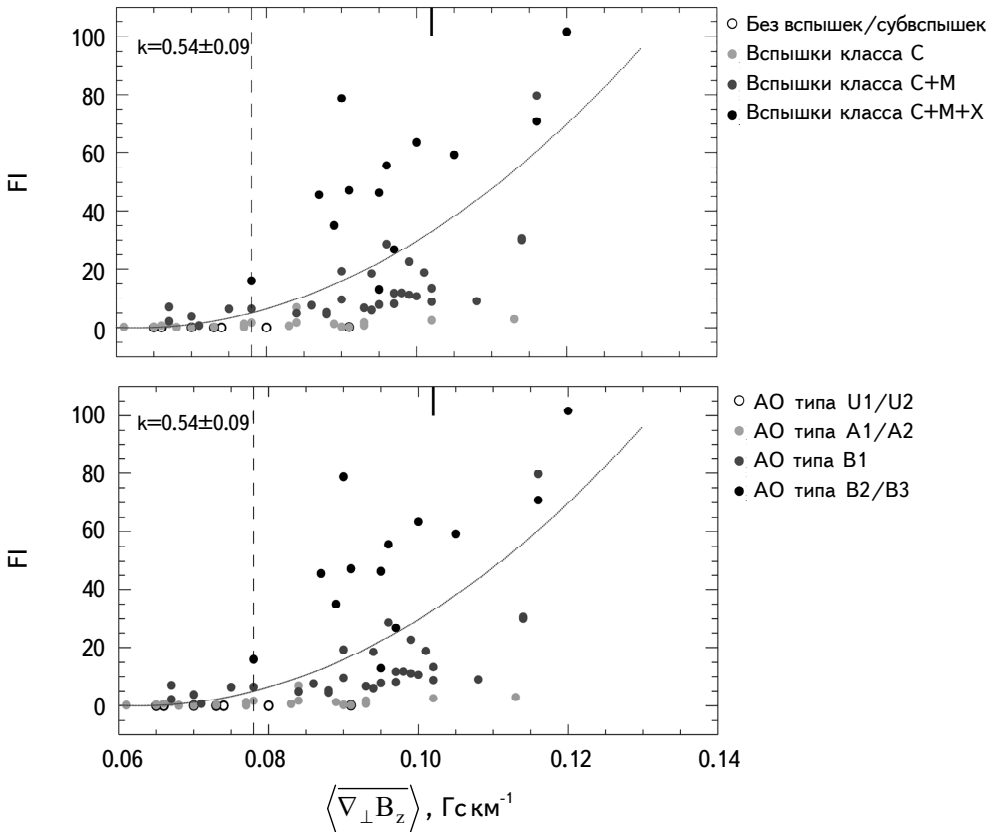


Рис.1. Графики зависимости между усредненной по времени мониторинга средней по АО величиной поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ и уровнем вспышечной активности области (вспышечным индексом) FI. На верхнем графике символами разного цвета закодирован рентгеновский класс наиболее мощной вспышки, зарегистрированной в АО, на нижнем - тип АО согласно ММК. Вертикальным пунктиром с длинным штрихом отмечено критическое (пороговое) значение величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$. Вертикальной жирной чертой отмечено положение области NOAA 12673 с FI = 223.858.

класса С, темно-серыми - АО, в которых, помимо вспышек класса С зафиксированы вспышки рентгеновского класса М, черными кружочками - области, в которых зафиксирована по крайней мере одна вспышка рентгеновского класса X1.0 и выше). Информацию о наиболее мощной вспышке в АО и дате ее наблюдения можно посмотреть в четвертом столбце табл.1 в [1]. На нижнем графике рис.1 и далее на рис.2-4 закодированы типы АО согласно ММК: пустыми кружочками отмечены области типа U1/U2, серыми - области типа A1/A2, темно-серыми - АО типа B1, черными кружочками - области типа B2/B3. Черной жирной чертой на верхней абсцисе графиков рис.1 и последующих рисунках отмечено местоположение области NOAA 12673 - она имеет высокий вспышечный индекс ($FI_{12673} = 223.858$), вследствие чего демонстрация этой точки ухудшает нормальную читабельность графиков.

Как видно из графиков, представленных на рис.1, зависимость $\langle \overline{\nabla_{\perp} B_z} \rangle$ - FI не линейная, а квадратичная, с коэффициентом корреляции, рассчитанного методом наименьших квадратов, $k=0.54$. Обращает на себя внимание относительно

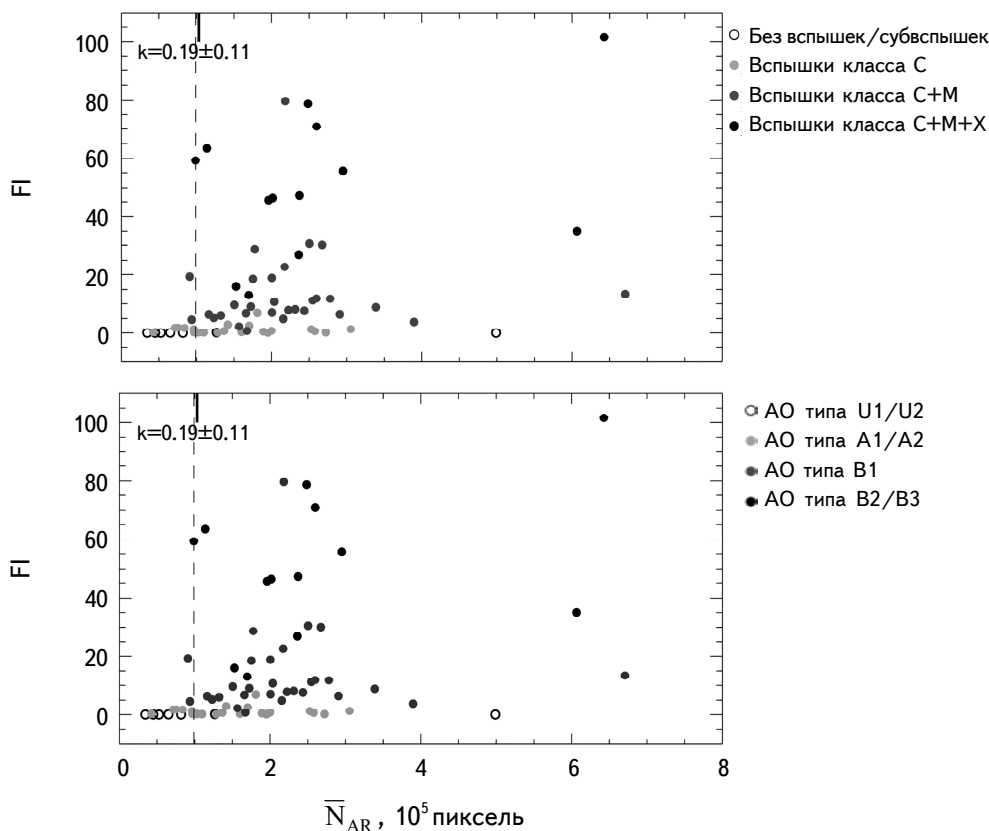


Рис.2. Графики зависимости между общей площадью АО (количество пикселей внутри маски bitmap, N) и вспышечным индексом (FI). Обозначения те же, что и на рис.1.

малый разброс точек по горизонтальной оси - для большинства АО исследуемой выборки величина $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ находится в пределах 0.08-0.12 Гс км⁻¹. Небольшой разброс значений величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ обусловлен ее зависимостью от площади АО. В то же время, вспышечная продуктивность АО достаточно слабо зависит от ее площади - встречаются как компактные области с высокой активностью, так и крупные; в то же время большие по площади АО не всегда являются источниками вспышек высоких рентгеновских классов. Достаточно наглядно это продемонстрировано на графиках рис.2, где представлена зависимость вспышечного индекса от площади АО (количества пикселей в маске bitmap).

Отсутствие высокой корреляции между анализируемыми параметрами на графиках рис.1 и рис.2 ни коим образом не означает одновременно отсутствие в них ценной для анализа информации. Вследствие того, что анализируемая

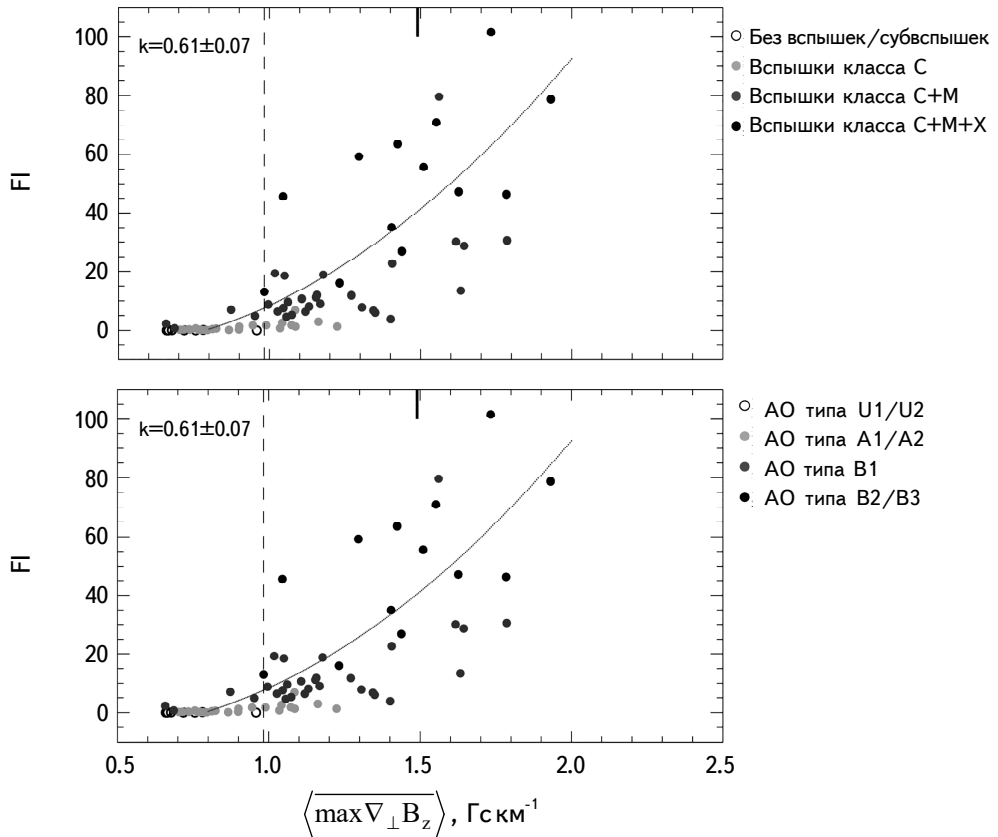


Рис.3. Зависимость между усредненной по времени величиной средней величины поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля в окрестности точки с максимальным значением градиента $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle$ и вспышечным индексом (FI) АО. Обозначения те же, что и на рис.1.

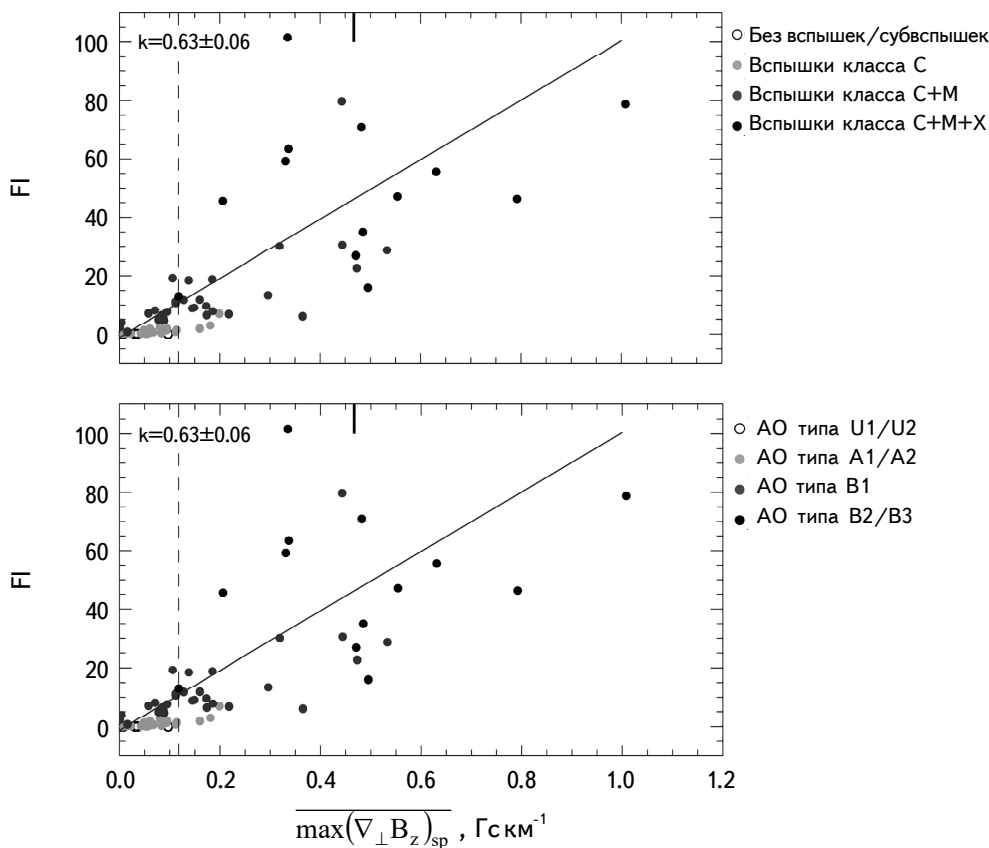


Рис.4. Зависимость между усредненной по времени максимальной величиной поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля между пятнами в АО $\overline{\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}}$ и вспышечным индексом (FI) АО. Обозначения те же, что и на рис.1.

выборка достаточно обширна, графики позволяют оценить пороговые значения параметров $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ и $\bar{N}_{AR}$: при превышении данной величины в АО могут фиксироваться вспышки наиболее высоких рентгеновских классов, а в случае, если значения этих параметров ниже пороговых, следует ожидать более низкой вспышечной продуктивности области. Из графиков рис.1 и рис.2, а также данных табл.1, следует, что пороговое значение для величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ равно 0.078 Гс км^{-1} , для величины $\bar{N}_{AR}$ - $\approx 10^5$ пикселей.

Зависимость $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle$ - FI показана на рис.3. Как и для зависимости $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ - FI, здесь аппроксимация квадратичная с коэффициентом корреляции $k=0.61$. Интересно отметить, что аппроксимация линейной функцией дает коэффициент корреляции очень близкий по своему значению к коэффициенту корреляции при аппроксимации квадратичной функцией. Таким образом,

зависимость $\langle \overline{\max \nabla_{\perp} B_z} \rangle$ - FI можно считать квазилинейной. Более высокая корреляция между величинами $\langle \overline{\max \nabla_{\perp} B_z} \rangle$ и FI по сравнению с корреляцией для пары $\langle \overline{\nabla_{\perp} B_z} \rangle$ - FI говорит о правильности выбора величины $\langle \overline{\max \nabla_{\perp} B_z} \rangle$ как параметра, описывающего поперечную компоненту градиента продольного магнитного поля.

Для величины $\langle \overline{\max \nabla_{\perp} B_z} \rangle$, как и для параметров $\langle \overline{\nabla_{\perp} B_z} \rangle$ и $\bar{N}_{AR}$, исходя из данных рис.3 и табл.1, можно определить пороговое значение, которое равно 0.983 Гс км^{-1} .

4.2. Классический подход к вычислению поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля: статистический анализ и основные результаты. В рамках применения классического подхода, основным параметром, который описывает величину $\nabla_{\perp} B_z$ был принят максимальный градиент между пятнами в АО $\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}$. Графики зависимости $\overline{\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}}$ - FI представлены на рис.4.

Здесь видно, что зависимость $\overline{\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}}$ - FI линейная, с коэффициентом корреляции $k=0.63$. Как и в случае с параметрами, описывающими поперечную компоненту градиента продольного магнитного поля в рамках современного подхода вычисления данной величины, параметр $\overline{\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}}$ также имеет пороговое значение, равное 0.118 Гс км^{-1} , что близко к значению в 0.1 Гс км^{-1} , определенному советскими астрономами еще в конце 50-60-х годах XX в. [10-12].

5. Выводы и обсуждение. На статистически значимой выборке из 75 АО 24-го цикла солнечной активности, обладающих разным уровнем вспышечной продуктивности, произведен анализ параметров, описывающих величину поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля $\nabla_{\perp} B_z$, подтверждены и дополнены результаты, полученные ранее [2] на существенно меньшем статистическом материале. Сделаны следующие выводы:

1. Отсутствует линейная зависимость между усредненной за время наблюдения средней величиной поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля $\langle \overline{\nabla_{\perp} B_z} \rangle$ и вспышечным индексом (FI) АО. Нелинейный характер зависимости и низкий коэффициент корреляции ($k=0.54$) для пары параметров $\langle \overline{\nabla_{\perp} B_z} \rangle$ - FI объясняется тем, что величина $\langle \overline{\nabla_{\perp} B_z} \rangle$ является функцией площади АО, в то время, как величина вспышечного индекса АО от площади не зависит. Зависимостью от площади можно объяснить и сравнительно малый разброс в величине $\langle \overline{\nabla_{\perp} B_z} \rangle$ для АО с низкой и высокой вспышечной продуктивностью: для подавляющего большинства областей анализируемой выборки данный параметр находится в диапазоне значений $0.08-0.12 \text{ Гс км}^{-1}$.

2. Существует квазилинейная зависимость между усредненной по времени

величиной средней величины поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля в окрестности точки максимума величины градиента $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle$ и вспышечным индексом АО (FI) с коэффициентом корреляции $k = 0.61$.

3. Существует линейная/квазилинейная зависимость между усредненной по времени максимальной величиной поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля между пятнами $\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}$ и уровнем вспышечной продуктивности АО (FI) с коэффициентом корреляции $k = 0.63$.

4. Статистический анализ позволяет найти пороговые значения параметров, описывающих поперечную компоненту градиента продольного магнитного поля:

а. Для усредненной по времени средней по АО величины поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle \geq 0.078 \text{ Гс км}^{-1}$;

б. Для усредненной по времени средней величины поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля в окрестности его максимального значения $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle \geq 0.983 \text{ Гс км}^{-1}$;

в. Для усредненной по времени максимальной величины поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля между пятнами в АО $\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp} \geq 0.118 \text{ Гс км}^{-1}$.

При значениях анализируемых параметров, ниже критических, ни в одной из областей анализируемой выборки вспышек рентгеновских классов X не фиксировалось.

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 интерес к работе. 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. II. STATISTICAL ANALYSIS

Yu.A.FURSYAK

The work is part of a study devoted to the study of longitudinal magnetic field gradients in active regions (ARs) with different levels of flare productivity. Here, we performed a statistical analysis of the parameters describing the transverse component of the longitudinal magnetic field gradient $\nabla_{\perp} B_z$ in the active regions of the AR: the AR-averaged transverse component of the longitudinal magnetic field gradient $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$, the average $\nabla_{\perp} B_z$ in the vicinity of a point with its maximum value $\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle$, the maximum value of $\nabla_{\perp} B_z$ between pairs of spots in the AR $\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}$. To calculate the indicated parameters, we used magnetograms of the B_z component of the magnetic field vector at the level of the solar photosphere obtained by the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) onboard the Solar Dynamics Observatory (SDO). The statistical sample contains data on 75 ARs. The values of the analyzed parameters averaged over the monitoring time are compared with the level of the flare productivity of the AR (flare index, FI). It is shown that: 1. The dependence $\overline{\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle}$ (the overline indicates the averaging over AR monitoring time) - FI is quadratic with the correlation coefficient $k=0.54$, and the spread of values of the values $\overline{\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle}$ is small (for the vast majority of the studied ARs, it is within $0.08 - 0.12 \text{ G km}^{-1}$) and differs very little for ARs with low and high flare productivity, which can be explained by the dependence of the value of $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ on the AR area. 2. Dependence $\overline{\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle}$ - FI is quasi-linear with correlation coefficient $k=0.61$. 3. Dependence $\overline{\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}}$ - FI is linear with correlation coefficient $k=0.63$. 4. The threshold values of the analyzed parameters are revealed: for the $\overline{\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle} \geq 0.078 \text{ G km}^{-1}$, for the $\overline{\langle \max \nabla_{\perp} B_z \rangle} \geq 0.983 \text{ G km}^{-1}$, and for the parameter $\overline{\max(\nabla_{\perp} B_z)_{sp}} \geq 0.118 \text{ G km}^{-1}$. At lower values of the analyzed parameters, the X-class X-ray flares were not recorded in any AR of the analyzed sample.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *Yu.A.Fursyak*, Astrophysics, **66**, 532, 2023.
2. *Ю.А.Фурсяк*, Изв. Крымск. Астрофиз. Обс., **118**, 39, 2022.
3. *P.H.Scherrer, J.Schou, R.I.Bush et al.*, Solar Phys., **275**, 207, 2012.
4. *W.D.Pesnell, B.J.Thompson, P.C.Chamberlin*, Solar Phys., **275**, 3, 2012.
5. *M.B.Bobra, X.Sun, J.T.Hoeksema et al.*, Solar Phys., **289**, 3549, 2014.
6. *А.В.Жукова*, Изв. Крымск. Астрофиз. обс., **114**, 74, 2018.
7. *V.I.Abramenko, A.V.Zhukova, A.S.Kutsenko*, Geomagnetism and Aeronomy, **58**, 1159, 2018.
8. *V.I.Abramenko*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **507**, 3698, 2021.
9. *V.I.Abramenko*, Astrophys. J., **629**, 1141, 2005.
10. *А.Б.Северный*, Изв. Крымск. Астрофиз. Обс., **20**, 22, 1958.
11. *А.Б.Северный*, Изв. Крымск. Астрофиз. Обс., **22**, 12, 1960.
12. *А.М.Зверева, А.Б.Северный*, Изв. Крымск. Астрофиз. Обс., **41-42**, 97, 1970.