

Взаимодействие радиального потока скорости вещества и магнитного потока в зарождающихся активных областях Солнца

А. М. Садыков^{1,2,*}, С. А. Красоткин^{1,2,†}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики космоса. Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына. Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2 (Поступила в редакцию 10.06.2024; подписана в печать 19.11.2024)

В настоящей статье авторами исследуются физические процессы формирования активных областей (АО). В частности, проверяется гипотеза всплывания магнитной трубки (магнитного потока) на основе прямых наблюдений магнитного поля и доплеровского смещения, полученных из наблюдений наземной сети телескопов Global Oscillation Network Group (GONG). Исследование охватывает 24 зарождающиеся АО в период с 2011 по 2022 г. Была обнаружена сильная корреляция между магнитным потоком и потоком радиальной скорости опускания. Результаты показывают, что гипотеза всплывания магнитной трубки не может полностью объяснить эволюцию АО на ранних стадиях их развития.

PACS: 96.60.рj, 96.60.Mz, 96.60.Nv, 96.60.Qc, 96.60.qd

УДК: 523.9-1/-8, 523.982.

Ключевые слова: Солнце, активные области Солнца, всплывание магнитной трубки, магнитные поля активных областей Солнца, поля скоростей активных областей Солнца.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день отсутствуют общепринятые взгляды на физические процессы, происходящие в конвективной зоне и фотосфере Солнца, связанные с возникновением активных областей (АО) и развитием соответствующих магнитных полей. Одной из наиболее распространенных теорий эволюции АО является гипотеза всплывающей магнитной трубки, или магнитного потока [1]. Данная концепция широко используется в теоретических исследованиях [2], что подчеркивает необходимость проверки её корректности на основе прямых наблюдений магнитного поля и Доплеровских измерений.

1. МОДЕЛЬ ВСПЛЫВАЮЩЕЙ МАГНИТНОЙ ТРУБКИ

Модель всплывающей магнитной трубки предполагает, что биполярные группы пятен образуются путем всплывания магнитной трубки из конвективной зоны на фотосферу [3, 4]. Согласно этой модели, сильное магнитное поле в предполагаемой трубке приводит к снижению плотности вещества. В результате чего часть магнитной трубки начинает всплывать и увеличиваться в сечении. Такой магнитный поток называют Ω -образным. В рамках данной модели проводилось компьютерное моделирование с использованием полной системы уравнений магнитной гидродинамики [5, 6].

По мере подъёма к верхним слоям конвективной зоны на плазму в магнитной трубке начинает действовать сила Лоренца, создаваемая глобальным магнитным полем. Под влиянием этой силы магнитная трубка закручивается [7]. Это искривление может вызывать как небольшое изменение угла наклона трубки к экватору, так и её закручивание, в результате которого образуется петля.

При внимательном рассмотрении модели всплывающего магнитного потока становятся заметны некоторые недочеты.

1. Модель предполагает существование магнитной трубки в глубине конвективной зоны. Однако не существует объяснения, как эта трубка формируется, поэтому в модель просто «по умолчанию» закладывается её наличие как само собой разумеющееся.
2. Во время всплывания магнитной трубки на фотосферу должно быть заметным сильное горизонтальное магнитное поле перед тем, как появятся пятна. Это поле является вершиной восходящего контура Ω -петли. Однако, данного явления не наблюдается.
3. Появление магнитной трубки должно вызывать значительные временные изменения в уже сложившемся поле течений. Однако вместо этого хорошо заметно «просачивание» магнитного поля, которое не нарушает супергрануляционные и мезогрануляционные поля скоростей. Например, когда вершина восходящего контура поднимается вверх, сильное горизонтальное магнитное поле должно придавать конвективному потоку вещества структуру вала [8], но и этого не наблюдается.

* sadykov.am19@physics.msu.ru

† sergekras@rambler.ru

4. Из-за значительной разницы давления плазмы на разной глубине фотосферы и конвективного слоя, вещество, содержащееся в магнитной трубке, должно растечься ещё до того, как трубка достигнет фотосферы.
5. Модель всплывающей магнитной трубки противоречит закону Джоя, который был получен на основе наблюдений. Этот закон описывает зависимость угла наклона биполярной группы солнечных пятен в зависимости от широты. Только при определённом значении магнитного поля в всплывающем потоке угол наклона будет соответствовать полученному из закона Джоя [9].
6. При всплывании магнитной трубки должно образоваться два пятна одновременно. Однако наблюдения показывают, что сначала появляется только одно пятно, а второе возникает обычно возникает через сутки. «Обычно пятна в западной части образуются на день раньше, чем в восточной» [10].
7. В данной модели не учитывается возможное существование в области с преобладающей полярностью магнитного поля небольших участков с противоположной полярностью [8].

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Согласно модели всплывающей магнитной трубки, на уровне фотосферы должно наблюдаться локальное увеличение потока скорости, направленного от центра Солнца и отличающегося от квазирегулярного движения вещества в гранулах. Поток скорости вещества определяется как поверхностный интеграл второго рода, то есть произведение величины скорости подъема или опускания на площадь, на которой вычисляется данная скорость.

По расчетам Калигари и др. [11], радиальная скорость всплывающей части магнитной трубки увеличивается по мере её приближения к поверхности. На уровне фотосферы радиальная скорость магнитной трубки должна превышать ≈ 500 м/с, что выше радиальной скорости плазменного движения в центре гранулы, составляющей примерно 300 м/с [12]. Таким образом, если гипотеза всплывающей магнитной трубки верна, всплытие намагниченной плазмы должно приводить к значительному увеличению потоков восходящей скорости и усилению магнитного поля.

Подтверждение всплытия намагниченной плазмы может быть получено путем сравнения наблюдаемых на фотосфере потоков магнитного поля и радиальной скорости вещества на одинаковых временных и пространственных масштабах с учетом момента появления АО. Для этого, принимая во внимание особенности расположения каждой АО на солнечном диске, должны

быть определены характеристики поведения типичной АО, усредненной по используемой выборке.

3. КРИТЕРИИ ОТБОРА АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

АО характеризуются местом появления на Солнце, магнитной конфигурацией и пространственной близостью к соседним АО, что приводит к необходимости учета следующих особенностей:

1. в момент зарождения АО она должна быть расположена непосредственно в центральной части солнечного диска, что позволит с легкостью рассчитать радиальные скорости; если измерение скорости проводится вдали от центра солнечного диска, трудно выявить радиальную составляющую скорости из-за существенного наклона луча зрения;
2. модель всплывающей магнитной трубки объясняет возникновение биполярной группы пятен, но не может объяснить зарождение и развитие АО со сложной структурой, в частности со слабо изолированными и плохо локализованными магнитными полюсами, что приводит к ограничениям на выбор АО.

Исходя из вышесказанного, были введены следующие критерии отбора АО:

- в начальный момент времени на магнитограмме должна появиться зарождающаяся АО;
- наблюдаемое начальное положение зарождающейся АО должно находиться в центральной части солнечного диска восточнее центрального меридиана;
- АО должна развиваться в четко выраженную конфигурацию с двумя или четырьмя пятнами.

На основании данных критериев были отобраны 24 АО, наблюдаемых в период с 2011 по 2022 гг.

В работе рассматривались серии магнитограмм и доплерограмм, полученных с помощью сети наземных телескопов Global Oscillation Network Group (GONG) с временным разрешением 4 ч в течение 5–6 дней. Каждая из выбранных АО первоначально располагалась в центральной части солнечного диска немного восточнее центрального меридиана и позже развивалась в структуру, состоящую из двух и более пятен.

Временные ряды для всех рассмотренных АО были синхронизированы с использованием метода наложенных эпох так, что момент резкого роста магнитного потока соответствует $t = 0$ ч времени эволюции АО. Момент времени $t = 0$ ч определялся по следующему условию:

$$J_{\text{Mag}}(t_0 + 8\text{ч.}) - J_{\text{Mag}}(t_0) \geq 0.5 \times 10^{21} \text{ Мкс.}, \quad (1)$$

где $J_{\text{маг}}$ — это суммарный магнитный поток по выбранному участку солнечного диска ($4' \times 4'$), вычисляемый путем умножения значения магнитной индукции в каждом пикселе на площадь фотосферы, соответствующую этому пикселю. Благодаря выравниванию во времени стало возможным усреднение характеристик магнитного поля для каждого момента времени. Эволюция суммарного магнитного потока, усредненно-го по

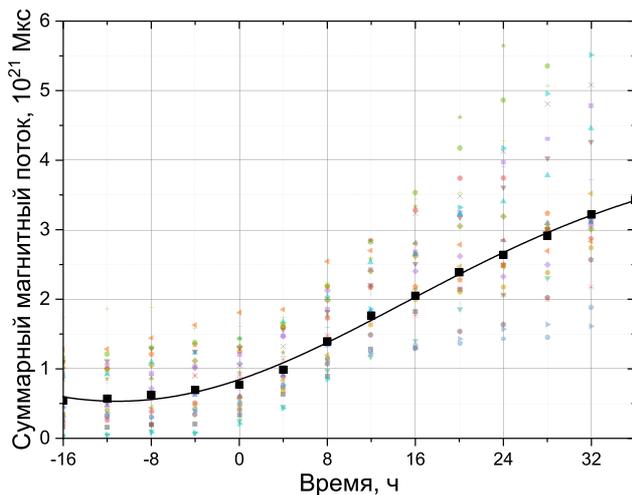


Рис. 1. Суммарный магнитный поток в зависимости от времени. В графике рассматривается значение магнитного потока, взятого под модулем. Данные по каждой АО обозначены своим цветом и символом на графике. Жирными черными точками обозначено усредненное значение, а черная линия является аппроксимацией. Хорошо заметен практически монотонный рост потока магнитного поля со временем

Для расчета потоков радиальной скорости подъема и опускания вещества относительно спокойной фотосферы необходимо выделить соответствующие области, для чего необходимо сперва определить среднюю скорость вещества по спокойной фотосфере.

В доплерограммах GONG среднее значение доплеровского смещения по всему диску Солнца близко к нулю (≈ 0 м/с). Однако среднее значение для небольших спокойных участков Солнца размеров порядка АО в различных частях солнечного диска отличается от нуля. Это связано с тем, что структура гранул наблюдается под разными углами в зависимости от положения исследуемой области. При наблюдении гранул спокойной фотосферы вблизи центра солнечного диска, когда луч зрения направлен параллельно радиальным потокам вещества, должно доминировать восходящее движение вещества, направленное к наблюдателю. Другая ситуация наблюдается при наблюдениях под углом $\geq 45^\circ$: из-за трёхмерной структуры гранул по лучу зрения преимущественно наблюдаются области нисходящего потока.

Определение среднего значения скорости на выделенном кадре позволяет идентифицировать обла-

сти подъёма и опускания вещества. Областью подъёма считается участок со скоростями, превышающими среднее значение, а областью опускания — со скоростями ниже средней.

Дополнительно используется фильтр, отсекающий значения скорости, отличающиеся от средней более чем на утроенное значение стандартного отклонения, что позволяет устранить незначительные вариации скорости и выделить только области сильного отклонения.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Как видно на рис. 1, магнитный поток в основном монотонно увеличивается со временем. Кроме того, он наглядно иллюстрирует метод наложения эпох данных АО в момент резкого увеличения магнитного потока (см. уравнение 1), что соответствует метке времени $t_0 = 0$ ч.

Поток радиальной скорости подъема вещества проясляет нисходящую динамику в зависимости от времени (рис. 2, а), однако данный нисходящий тренд нельзя назвать очевидным. При этом поток радиальной скорости опускания вещества заметно растет со временем (рис. 2, б), к тому же такой рост намного больше, чем снижение в потоке радиальной скорости подъема вещества.

На графиках потока радиальной скорости подъема или опускания вещества в зависимости от суммарного магнитного потока можно визуальнo наблюдать поведение потоков радиальных скоростей. Для потоков радиальной скорости подъема и опускания наблюдается сильно выраженная зависимость от величины магнитного поля, что подтверждается значениями коэффициентов корреляции Пирсона: для абсолютных значений усреднённых потоков подъема он равен $-0,94$ (рис. 3, а), а потоков опускания $0,96$ (рис. 3, б).

Таким образом, при увеличении магнитного поля усиливается поток радиальной скорости опускания вещества, а поток радиальной скорости подъёма, наоборот, уменьшается.

Стоит отметить, что наблюдаемая в настоящей работе величина потока радиальной скорости подъема или опускания вещества является именно потоком скорости. Для получения потока всплывающего или опускающегося вещества не хватает множителя плотности вещества, которого пока нельзя измерить прямыми наблюдениями. Наблюдаемое доминирование потока радиальной скорости опускания над потоком подъема хоть и может выглядеть на первый взгляд странным, но всё становится на свои места, если учесть, что опускающееся вещество намного разреженнее, чем поднимающееся, поддерживая баланс вещества в АО.

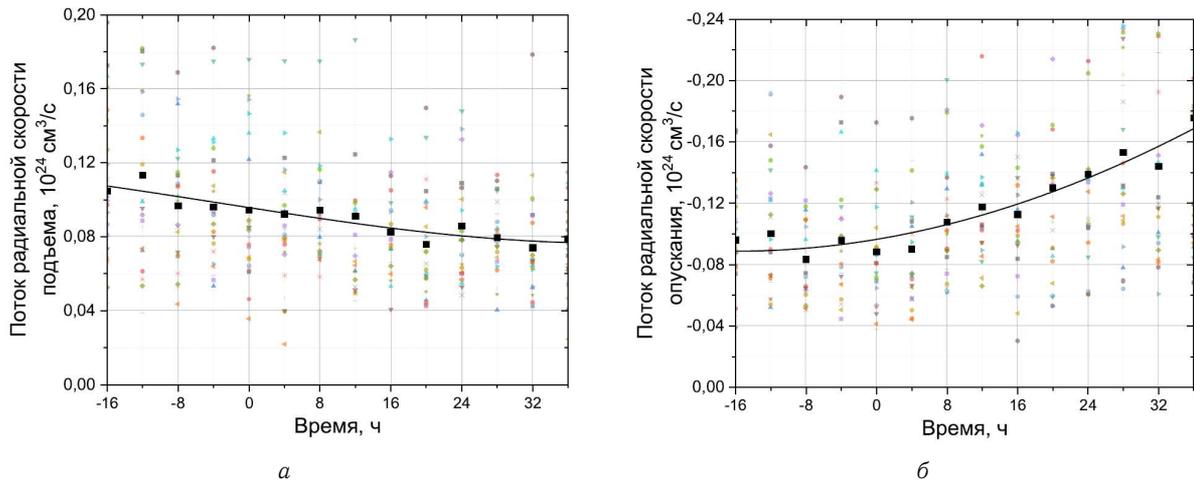


Рис. 2. Поток радиальной скорости подъема (а) и опускания (б) в зависимости от времени. Данные по каждой АО обозначены своим цветом и символом на графике. Жирными черными точками обозначено усредненное значение, а черная линия является аппроксимацией. Хорошо заметен рост потока радиальной скорости опускания вещества со временем, при этом потока радиальной скорости подъема вещества проявляет нисходящую динамику

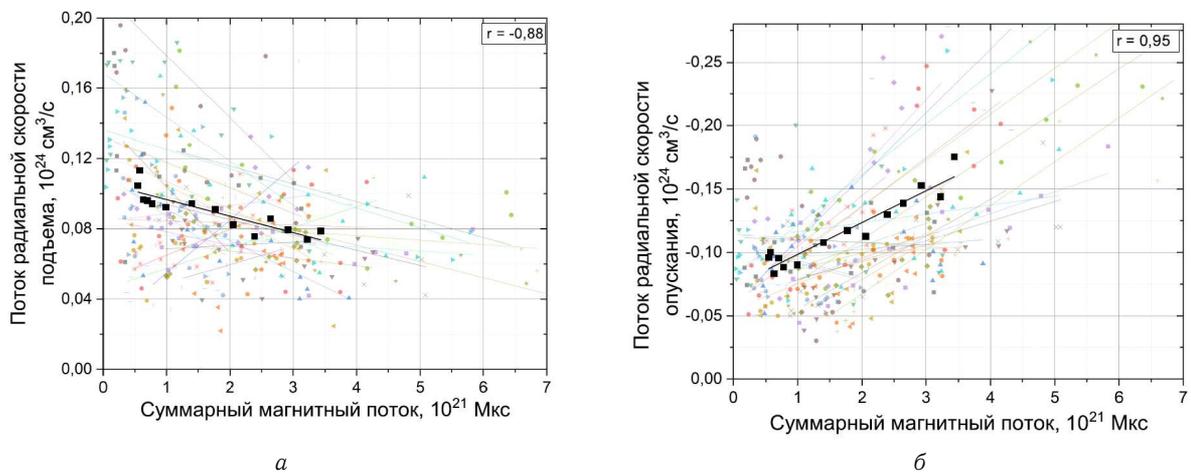


Рис. 3. Поток радиальной скорости подъема (а) и опускания (б) в зависимости от суммарного магнитного потока. Каждая точка на графике обозначает одновременно значения по потоку магнитного поля и потоку радиальной скорости вещества в каждый момент времени для каждой АО. Прямые обозначают линию тренда для каждой АО, рассчитанной при помощи линейной аппроксимации. Жирные точки обозначают усредненные значения потока магнитного поля и потока радиальной скорости вещества в каждый момент времени, черная прямая является соответствующей линией тренда

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основываясь на полученных результатах, можно заключить, что на ранних стадиях эволюции АО наблюдается синхронное возрастание потока магнитного поля вместе с возрастанием потока радиальной скорости опускания вещества.

Гипотеза всплывающей магнитной трубки предполагает синхронное увеличение магнитного потока и потока радиальной скорости подъема. Однако в исследованных АО не было обнаружено соответствующих синхронных изменений, потенциально соответствующих данной модели.

Таким образом, модель всплывания магнитной трубки следует использовать с осторожностью при описании эволюции АО, по крайней мере на начальных этапах их развития, что указывает на локальный, а не глобальный характер процессов, происходящих в фазе формирования АО.

Благодарности

Авторы выражают огромную благодарность доктору физ.-мат. наук А. В. Гетлингу: без его экспертизы, вдохновения и неоценимых рекомендаций проведение настоящего исследования было бы невозможно.

- [1] *Parker E.N.* // The Astrophys. J. **121**. 491 (1955).
[2] *Ишков В.Н.* // Изв. РАН, серия физ. **62**, № 9. 1835 (1998).
[3] *Martres M.-J., Soru-Escaut I., Rayrole J.* // Solar Physics. **32**, N 2. 365 (1973).
[4] *Витинский Ю.И., Иханов Р.Н.* // Солнечные данные. № 7. 66 (1964).
[5] *Fan Y., Featherstone N., Fang F.* // ArXiv e-prints, arXiv:1305.6370. (2013).
[6] *Rempel, M., Cheung, M.C.M.* // The Astrophys. J. **785**, Issue 2, article id. 90. (2014).
[7] *Sakurai T.* // Publ. Astro. Soc. Japan. **28**, N 2. 177 (1976).
[8] *Getling A.V., Ishikawa R., Buchnev A.A.* // Solar Physics. **291**. 371 (2016).
[9] *D'Silva S., Choudhuri A.R.* // Astronomy and Astrophysics. **272**. 621 (1993).
[10] *Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В.* // Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М.: Наука, 1986.
[11] *Caligari P., Moreno-Insertis F., Schussler M.* // The Astrophys. J. **441**. 886. (1995).
[12] *Зириц Г.* // Солнечная атмосфера. Пер. с англ. под ред. Э.В. Кононовича; послесл. Г. Зирина. М.: Мир, 1969.

Interaction of Radial Velocity Flow and Magnetic Flux in Emerging Active Regions of the Sun

A. M. Sadykov^{1,a}, S. A. Krasotkin^{2,b}

¹*Department of Space Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

²*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119191, Russia*

E-mail: ^asadykov.am19@phys.msu.ru, ^bsergekras@rambler.ru

In this article, the authors investigate the physical processes involved in the formation of active regions (AR). Specifically, the magnetic flux emergence (magnetic tube) hypothesis is tested based on direct observations of the magnetic field and Doppler shifts obtained from the Global Oscillation Network Group (GONG) ground-based telescope network. The study encompasses the analysis of 24 emerging ARs observed during the period from 2011 to 2022. A strong correlation between magnetic flux and the downward radial velocity flow was found. The results indicate that the magnetic flux emergence hypothesis cannot fully explain the evolution of ARs during the early stages of their development.

PACS: 96.60.ϕj, 96.60.Mz, 96.60.Hv, 96.60.Qc, 96.60.qd.

Keywords: The Sun, active regions of the Sun, magnetic flux emergence, magnetic fields of solar active regions, velocity fields of solar active regions.

Received 10 June 2024.

Сведения об авторах

1. Садыков Айдар Маратович — студент; e-mail: sadykov.am19@phys.msu.ru.

2. Красоткин Сергей Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: sergekras@rambler.ru.