

ЭФФЕКТЫ СКРУЧЕННОЙ МАГНИТНОЙ ТРУБКИ НА СТАДИИ ПОЯВЛЕНИЯ НОВОЙ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ В ФОТОСФЕРЕ

EFFECTS OF A TWISTED MAGNETIC ROPE AT THE STAGE OF THE APPEARANCE OF A NEW ACTIVE REGION IN THE PHOTOSPHERE

В.М. Григорьев *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, vgrig@iszf.irk.ru***Л.В. Ермакова** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, lermak@iszf.irk.ru***V.M. Grigoriev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, vgrig@iszf.irk.ru***L.V. Ermakova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, lermak@iszf.irk.ru*

Аннотация. По данным SDO/HMI изучена динамика мелкомасштабных элементов магнитного поля в фотосфере при образовании небольшой активной области USAF/NOAA 12761. Выбор этой области обусловлен тем, что она образовалась вблизи центрального меридиана в минимуме 11-летнего цикла солнечной активности при отсутствии сильных фоновых магнитных полей. Установлено, что за двое суток до образования первых пор наблюдаемая первоначально мелкомасштабная структура магнитного поля образует цепочки элементов обеих полярностей. Структура цепочек создает устойчивую линию раздела полярностей (ЛРП). В течение первых суток ориентация ЛРП меняется от квазиширотной до квазимеридиональной. После сравнения наблюдений с рядом теоретических моделей сделан вывод, что наблюдаемая динамика элементов магнитных цепочек согласуется с моделями выхода жгута магнитного потока на уровень фотосферы.

Ключевые слова: магнитное поле, активные области.

Abstract. Using SDO/HMI data, we have studied the dynamics of small-scale magnetic field elements in the photosphere during the formation of small active region USAF/NOAA 12761. The choice of this region is due to the fact that it formed near the central meridian at the minimum of the 11-year solar activity cycle in the absence of strong background magnetic fields. It has been established that two days before the formation of the first pores, the initially observed small-scale structure of the magnetic field forms chains of elements of both polarities. The structure of the chains creates a stable polarity dividing line (PIL). During the first day, the orientation of PIL changes from quasi-latitudinal to quasi-meridional. After comparing observations with a number of theoretical models, we concluded that the observed dynamics of elements of magnetic chains is consistent with the models of emergence of a magnetic flux rope in the photosphere.

Keywords: magnetic field, active regions.

ВВЕДЕНИЕ

Активные области (АО) являются наиболее заметными проявлениями крупномасштабной магнитной активности в фотосфере Солнца. Знание процессов появления магнитных полей служит основой понимания связи динамо в конвективной зоне и магнитной активности в фотосфере и более высоких слоях солнечной атмосферы. Предположение Паркера [Parker, 1955] о том, что образование солнечных пятен является результатом плавучего подъема трубки магнитного потока из конвективной зоны, согласуется с результатами многочисленных теоретических и наблюдательных работ.

Приведем некоторые из наблюдательных работ. В Саянской обсерватории впервые ото дня ко дню проследили картину изменений вектора магнитного поля в фотосфере при возникновении АО [Варру et al., 1968]. Первые изменения в фоновом магнитном поле произошли за три дня до появления группы пятен.

За сутки до появления первого пятна появилась обширная область поперечного магнитного поля, пересекающая линию раздела полярностей (ЛРП) и пространственно совпадающая с областями появления главных пятен группы. Наибольших значений поперечное поле достигало в области ЛРП. Эти результаты многими исследователями рассматривались как экспериментальное подтверждение гипотезы о выходе трубки магнитного поля из-под фотосферы и о том, что связанная с этим процессом динамика фотосферного магнитного поля начинается до образования группы пятен. Низкое пространственное разрешение этой пионерской работы (18"×1.8") не влияет на упомянутые результаты, подтвержденные позднее с разрешением 2"×4" [Grigoryev et al., 1986]. Наблюдения с помощью стока-поляриметра с разрешением 1" [Lites et al., 1998] показали, что область выхода магнитного потока испещрена горизонтальными магнитными элементами, поднимающимися со скоростью ~1 км/с.

Из современных работ, основанных на наблюдательных данных, следует отметить [Mac Taggart et al., 2021; Levens et al., 2023; Magara, 2019; Weber et al., 2023; Poisson et al., 2024].

Кроме многочисленных моделей, в которых рассматривается выход магнитного потока в виде Ω -петли, сформированной в области тахоклина, существуют альтернативные модели, рассматривающие формирование магнитного потока АО в самой конвективной зоне в результате магнитоконвекции. Детально магнитоконвекция рассматривается в обзорных частях работ [Jabbari et al., 2016; Getling et al., 2016; Getling, Buchnev, 2019; Brandenburg, 2005]. Чаще обсуждаются теоретические модели, и лишь небольшая часть посвящена анализу наблюдений на самой ранней стадии появления АО. Только в [Getling, Buchnev, 2019] появление АО с момента рождения первых пор в фотосфере исследуется с высоким временным разрешением.

Формирование АО начинается со сложной динамики появления мелкомасштабных магнитных потоков. Постепенно образуются области преимущественной концентрации узлов магнитного потока. В дальнейшем формируются солнечные пятна. В хромосфере на ранней стадии возникновения АО появляются арочные волоконные системы — небольшие яркие флоккулы, пересеченные темными волоконцами, концы которых располагаются в областях магнитного поля противоположных полярностей. Предполагается, что это вершины поднимающихся арок магнитного поля. Наблюдаемое изменение угла наклона арочной системы в плоскости фотосферы Frazier [1972] связал с последовательным выходом петель магнитного поля.

Некоторые модели предсказывают, что всплывающая трубка магнитного потока должна быть скручена, чтобы пройти через конвективную зону [Emonet, Moreno-Insertis, 1998; Cheung et al., 2006; Martinez-Sykora et al., 2015]. Под воздействием конвективных движений поднимающаяся трубка потока «разломачивается» [Hood et al., 2012]. Поэтому вначале следует ожидать появления отдельных «прядей».

В ряде работ [Archontis et al., 2009; Luoni et al., 2011; Poisson et al., 2015] были найдены признаки скрученности выходящей трубки потока: сигмоидная структура силовых линий магнитного поля и наличие языков (tongue) на магнитограммах. Однако эти особенности могут возникать и при всплытии предварительно не скрученной трубки потока [Prior, Mac Taggart, 2016; Syntelis et al., 2013] под действием движений. Поэтому вопрос о скрученности всплывающей трубки потока остается дискуссионным и широко обсуждается (например [Mahlmann et al., 2023; Sadeghi et al., 2023]).

Мы анализируем динамику мелкомасштабных элементов магнитного поля в фотосфере при образовании небольшой биполярной АО в условиях низкого уровня солнечной активности. Целью является попытка найти в морфологии магнитного потока, появляющегося в фотосфере за 1–2 сут до появления пор и пятен, признаки, которые могут указывать на скрученность поднимающейся магнитной трубки.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализируется появление локального магнитного поля в фотосфере на ранней стадии образования АО USAF/NOAA 12761 по данным SDO/HMI. Использовались данные продольного магнитного поля и изображения в континууме с интервалом 3 мин. Выбор этой малой АО обусловлен тем, что она образовалась вблизи центрального меридиана в минимуме 24–25-го циклов солнечной активности. Старые магнитные поля в это время отсутствуют, а близость к центральному меридиану позволяет рассматривать регистрируемое продольное магнитное поле как вертикальное. С 01:00 UT 27 апреля 2020 г. начался быстрый выход биполярного магнитного поля, в 01:40–02:00 видны первые поры. В это время АО находилась на центральном меридиане. Изучение динамики магнитного поля было начато с 25 апреля, за двое суток до образования группы пятен. В этот день на участке поверхности Солнца с координатами S17E27 образовалась биполярная область магнитного поля. При построении магнитограмм выделялись участки с одними и теми же координатами. На рис. 1 показаны магнитограммы. Размеры участка составляют 70 (вертикаль) $\times$ 80 пкс, 1 пкс $\sim$ 0.5 угл. сек. Первые семь магнитограмм являются почасовыми — этого достаточно, чтобы проследить динамику. Следующие пять выбраны с расчетом показа характерных особенностей. В начальный момент видны разрозненные магнитные образования размером несколько угл. сек с напряженностью менее 100 Гс. В наблюдаемой динамике магнитного поля не проявляется связь противоположных полярностей за исключением того, что к 02:00 UT в результате, казалось бы, беспорядочного появления, исчезновения и движения магнитных элементов сформировалась устойчивая ЛРП протяженностью 20–25 угл. сек, ориентированная под углом менее 40° к экватору (рис. 1, кадры 02:00, 03:00, 04:00 UT). Магнитные образования по обе стороны ЛРП образуют структуру цепочек, они по-прежнему разрозненные, но сохранение ЛРП от кадра к кадру свидетельствует о связи магнитных элементов по обе ее стороны. В дальнейшем при сохранении в целом упомянутой мелкомасштабной динамики элементов магнитного поля к 06:00 UT ЛРП повернулась против часовой стрелки на 65°. Это произошло менее чем за два часа.

Размер области выхода потока постепенно увеличивался, напряженность росла. Это особенно проявляется после 19:00 UT. К 21:00 (см. рис. 1) сформировалась компактная биполярная область. Мелкие магнитные образования видны в центральной части, некоторые исчезают, другие сливаются с более крупными. Динамика мелких магнитных элементов указывает на выход магнитных петель. ЛРП продолжила поворот против часовой стрелки, теперь ее наклон сходен с характерным для молодых АО. Такой же наклон сохраняется и на следующий день (кадр 26/09:18). Поры не появились ни в этот день, ни на следующий. С 01:00 UT 27 апреля начался быстрый выход биполярного магнитного поля, в 01–02:00 UT видны первые поры.

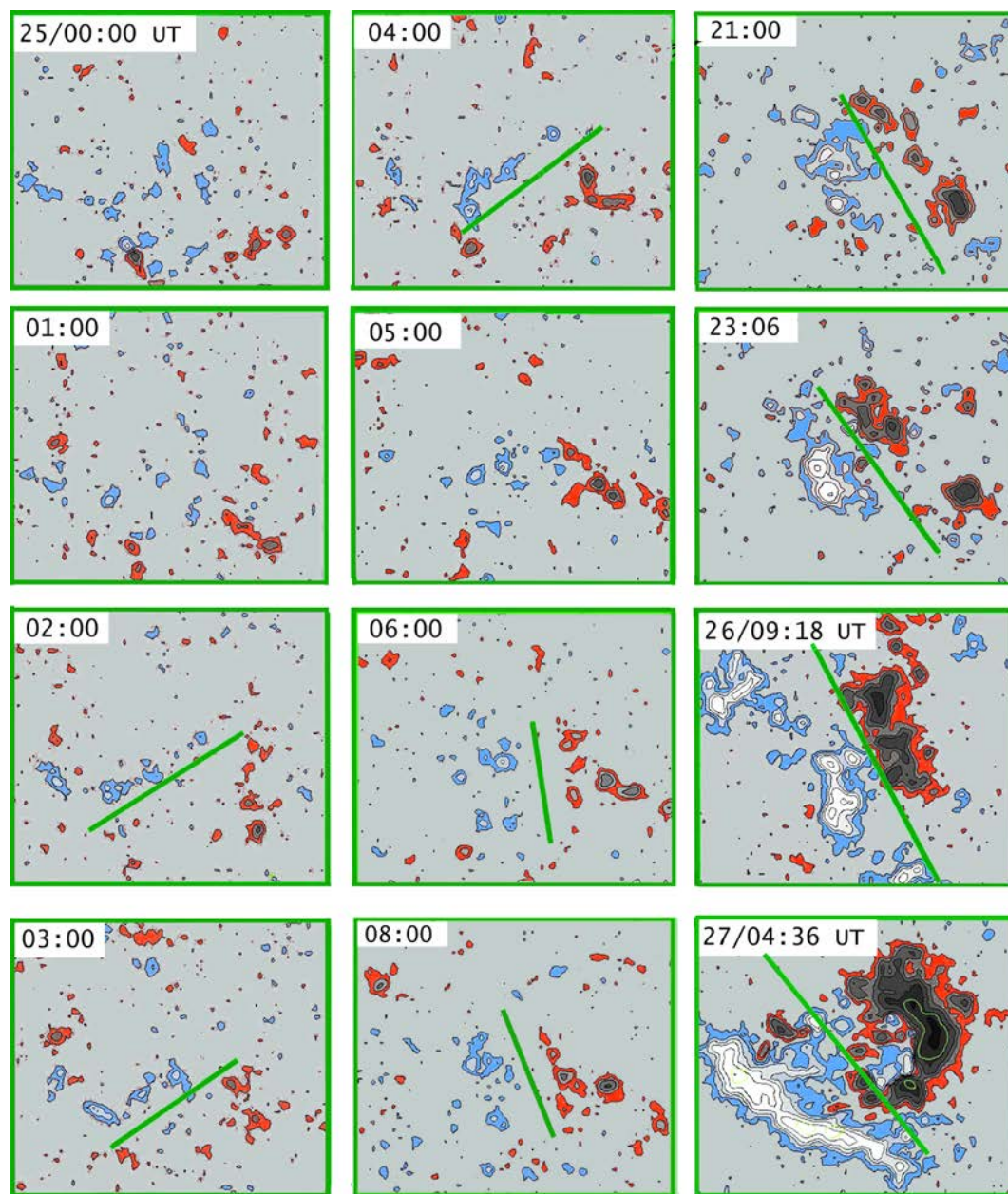


Рис. 1. Магнитограммы продольного магнитного поля. Изолинии $\pm 20, 50, 100, 200, 500$ Гс. Красно-черный цвет — области отрицательной полярности, сине-белый — положительной. Тонкий зеленый контур — участки с контрастом континуума 85 % относительно невозмущенной фотосферы (области образования пор). Прямые зеленые линии — ЛРП

На рис. 2 показана суточная динамика направлений ЛРП 25 апреля по трем кадрам. Видно, что в одном и том же месте на поверхности Солнца происходил последовательный поворот ЛРП.

Можно сделать следующие заключения. Магнитное поле новой АО появилось в фотосфере за двое суток до появления первых пор. Первоначально, когда выходящий поток был очень небольшим, создавалось впечатление разрозненных элементов магнитного поля, но спустя небольшое время сформировалась устойчивая ЛРП. Продолжающийся выход магнитного потока приводил к ее повороту, за первые сутки (02:00–21:00) поворот составил $\sim 90^\circ$ против часовой стрелки (см. рис. 2). Большая часть магнитного потока сосредоточилась в крупных образованиях. Такая динамика продольного магнитного поля

может отражать подъем из-под фотосферы петель магнитного поля. Ориентация их относительно экватора последовательно менялась. Сначала она была квазиширотной, к концу первого дня стала квазидолготной, что характерно для АО.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа наблюдательных данных появления магнитного потока небольшой АО показывают эволюцию мелкомасштабных образований, отражающих поперечное сечение отдельных трубок магнитного потока, пересекающих фотосферу. Концентрация магнитных элементов одинаковой полярности и формирование ЛРП, ориентированной преимущественно вдоль широты, напоминает картину

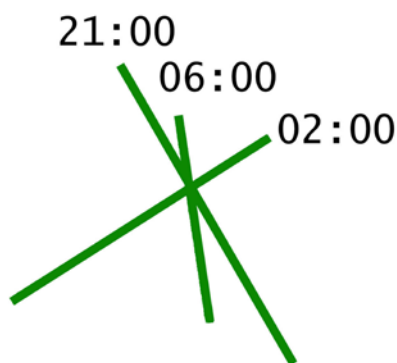


Рис. 2. Динамика направлений ЛРП 25 апреля

поднимающейся Ω -петли, образованной скрученными в жгут трубками магнитного потока. Вблизи границы фотосферы эта петля из-за резкого уменьшения газового давления образует систему разломчатых трубок потока, образующих внешнюю границу жгута [Hood et al., 2012].

Кинематическая модель поднимающегося тора магнитного потока, образованного жгутом магнитного поля, рассмотрена в [Magara, 2012]. В этой работе на рис. 1 представлен момент, когда трубка потока пересекает поверхность фотосферы. Структура вертикального поля в фотосфере образует две области противоположных полярностей, ориентированные в это время так, что ЛРП располагается в плоскости подъема тора. Такая картина соответствует наблюдаемой структуре поля при появлении АО 12761. Из-за резкого изменения газового давления жгут в своем апексе будет сильно деформироваться и, как указывают некоторые модели, петли магнитного поля будут приобретать сплюснутую форму (например [Hood et al., 2012]). Наиболее реалистичные модели формирования АО можно найти в [Cheung et al., 2010; Mac Taggart, Hood, 2009; Mac Taggart et al., 2021]. Работа [Mac Taggart, Hood, 2009] — одна из первых, которые показывают, что магнитная структура пятна представляет собой скрученную трубку уже до всплытия.

Наиболее полное радиативное МГД-моделирование появления и формирования АО на поверхности Солнца выполнено в [Cheung et al., 2010]. Показано, что первыми на поверхности появляются мелко-масштабные элементы магнитного поля, затем постепенно формируются большие магнитные концентрации. В дальнейшем образуется пара областей противоположных полярностей. Весь процесс выхода магнитного потока продолжается несколько часов. На смоделированных магнитограммах (см. рис. 1 из [Cheung et al., 2010]) в первые четыре часа вертикальная компонента магнитного поля показывает мелко-масштабную структуру, так что при усреднении ЛРП направлена вдоль будущей оси биполярной крупномасштабной области. В дальнейшем происходит концентрация, синтезированная магнитограмма в 6.7 ч уже обнаруживает биполярную крупномасштабную структуру, при этом ЛРП повернута на 90° относительно магнитограммы в 4.4 ч. Такая эволюция структуры магнитного поля в моделировании соответствует результатам нашего анализа наблюдений возникновения АО 12761.

Таким образом, появление первоначально цепочек мелко-масштабных магнитных элементов обеих полярностей и эволюция ЛРП служит еще одним признаком выхода жгута магнитного потока.

Авторы выражают благодарность А.И. Хлыстовой за подготовку данных SDO/HMI и рецензентам за полезные замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278). Данные SDO/HMI любезно предоставлены NASA/SDO и научной командой HMI.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Archontis V., Hood A.W., Savcheva A., et al. On the structure and evolution of complexity in sigmoids: A flux emergence model. *Astrophys. J.* 2009. Vol. 691. P. 1276–1291. DOI: [10.1088/0004-637X/691/2/1276](https://doi.org/10.1088/0004-637X/691/2/1276).
- Bappu M.K.V., Grigoryev V.M., Stepanov V.E. On the development of magnetic fields in active regions. *Solar Phys.* 1968. Vol. 4. P. 409–421. DOI: [10.1007/BF00147906](https://doi.org/10.1007/BF00147906).
- Brandenburg A. The case for a distributed solar dynamo shaped by near-surface shear. *Astrophys. J.* 2005. Vol. 625. P. 539–547.
- Cheung M.C., Moreno-Inertis F., Schüssler M. Moving magnetic tubes: fragmentation, vortex streets and the limit of the approximation of thin flux tubes. *Astron. Astrophys.* 2006. Vol. 451. P. 303–317. DOI: [10.1051/0004-6361/20054499](https://doi.org/10.1051/0004-6361/20054499).
- Cheung M.C.M., Rempel M., Title A.M., Schüssler M. Simulation of the formation of a solar active region. *Astrophys. J.* 2010. Vol. 720. P. 233–244. DOI: [10.1088/0004-637X/720/1/233](https://doi.org/10.1088/0004-637X/720/1/233).
- Emonet T., Moreno-Inertis F. The physics of twisted magnetic tubes rising in a stratified medium: two-dimensional results. *Astrophys. J.* 1998. Vol. 492. P. 804–821. DOI: [10.1086/305074](https://doi.org/10.1086/305074).
- Frazier E.N. The magnetic structure of arch filament systems. *Solar Phys.* 1972. Vol. 26. P. 130–141.
- Getling A.V., Buchnev A.A. The Origin and Early Evolution of a Bipolar Magnetic Region in the Solar Photosphere. *Astrophys. J.* 2019. Vol. 871. P. 224–232. DOI: [10.3847/1538-3575/aafad9](https://doi.org/10.3847/1538-3575/aafad9).
- Getling A.V., Ishikawa R., Buchnev A.A. Development of active regions: flows, magnetic-field patterns and bordering effect. *Solar Phys.* 2016. Vol. 291. P. 37–50. DOI: [10.1007/s11207-015-0844-3](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0844-3).
- Grigoryev V.M., Osak B.F., Selivanov V.L. Magnetic field dynamics in the active region in the early stage of development. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso.* 1986. Vol. 15. P. 55–63.
- Hood A.W., Archontis V., Mac Taggart D. 3D MGD Flux Emergence Experiments: Idealized models and coronal interactions. *Solar Phys.* 2012. Vol. 278. P. 3–31. DOI: [10.1007/s11207-011-9745-2](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9745-2).
- Jabbari S., Brandenburg A., Dhrubaditla M.N., et al. Turbulent reconnection of magnetic bipoles in stratified turbulence. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2016. Vol. 459. P. 4046–4056. DOI: [10.1093/mnras/stw888](https://doi.org/10.1093/mnras/stw888).
- Levens P.J., Norton A.A., Linton M.G., et al. Observations of twist, current helicity, and writhe in the magnetic knots of δ -sunspots consistent with the kink instability of a highly twisted flux rope. *Astrophys. J. Lett.* 2023. Vol. 954, no. 1. P. 20–28. DOI: [10.3847/2041-8213/acf0c6](https://doi.org/10.3847/2041-8213/acf0c6).
- Lites B.W., Skumanich A., Mart'nez Pillet V. Vector magnetic fields of emerging solar flux. I. Properties at the site of emergence. *Astron. Astrophys.* 1998. Vol. 333. P. 1053–1068.
- Luoni M.L., Demoulin P., Mandrini C.H., van Driel-Gesztelyi L. Twisted flux tube emergence evidenced in longitudinal magnetograms: magnetic tongues. *Solar Phys.* 2011. Vol. 270. P. 45–74. DOI: [10.1007/s11207-011-9731-8](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9731-8).

Mac Taggart D., Hood A.W. On the emergence of toroidal flux tubes: general dynamics and comparisons with the cylinder model. *Astron. Astrophys.* 2009. Vol. 507. P. 995–1004. DOI: [10.1051/0004-6361/200912930](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912930).

Mac Taggart D., Prior C., Raphadini B., et al. Direct evidence that twisted flux tube emergence creates solar active regions. *Nature Common.* 2021. Vol. 12. P. 6621–6628. DOI: [10.1038/s41467-021-26981-7](https://doi.org/10.1038/s41467-021-26981-7).

Magara T. How much does a magnetic flux tube emerge into the solar atmosphere? *Astrophys. J.* 2012. Vol. 748. P. 53–59.

Magara T. Merging and fragmentation in the solar active region 10930 caused by an emerging magnetic flux tube with asymmetric field-line twist distribution along its axis. *Journal of the Korean Astronomical Society.* 2019. Vol. 52. P. 89–97. DOI: [10.5303/JKAS.2019.52.4.89](https://doi.org/10.5303/JKAS.2019.52.4.89).

Mahlmann J.F., Philippov A.A., Mewes V., et al. Three-dimensional dynamics of strongly twisted magnetar magnetospheres: kinking flux tubes and global eruptions. *Astrophys. J. Lett.* 2023. Vol. 947. P. 34–50. DOI: [10.3847/2041-8213/accada](https://doi.org/10.3847/2041-8213/accada).

Martinez-Sykora J., Moreno-Insertis F., Cheung M.C.M. Multi-parametric study of rising 3D buoyant flux tubes in an adiabatic stratification using AMR. *Astrophys. J.* 2015. Vol. 814. P. 2–20. DOI: [10.1088/0004-637X814/1/2](https://doi.org/10.1088/0004-637X814/1/2).

Parker E.N. The formation of sunspots from the solar toroidal field. *Astrophys. J.* 1955. Vol. 121. P. 491–507. DOI: [10.1086/146010](https://doi.org/10.1086/146010).

Poisson M., Mandrini C.H., Demoulin P., Lopez Fuentes M. Evidence of twisted flux-tube emergence in active regions. *Solar Phys.* 2015. Vol. 290. P. 727–751. DOI: [10.1007/s112-7-014-0633-4](https://doi.org/10.1007/s112-7-014-0633-4).

Poisson M., Lopez Fuentes M., Mandrini C.H., et al. Modeling global magnetic flux emergence in bipolar solar active regions. *Solar Phys.* 2024. Vol. 299, iss. 4. Id. 56. DOI: [10.1007/s11207-024-02303-0](https://doi.org/10.1007/s11207-024-02303-0).

Prior C., Mac Taggart D. The emergence of braided magnetic fields. *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics.* 2016. Vol. 110. P. 432–457. DOI: [10.1080/03091929.2016.1216552](https://doi.org/10.1080/03091929.2016.1216552).

Sadeghi M., Bahari K., Karami K. The effect of flow and magnetic twist on resonant absorption of slow MGD waves in magnetic flux tubes. *Astrophys. J.* 2023. Vol. 944. P. 194–212. DOI: [10.3847/1538-4357/acb536](https://doi.org/10.3847/1538-4357/acb536).

Syntelis P., Archontis V., Gontikakis C., Tsinganos K. Flux emergence of a non-twisted magnetic flux tube. *The 11th Hellenic Astronomical Conference.* Athens, Greece. 2013. P. 10–10.

Weber M.A., Schunker H., Jouve L., Isik E. Understanding active region origins and emergence on the Sun and other cool stars. *Space Sci. Rev.* 2023. Vol. 219. Article id. 63. DOI: [10.1007/s11214-023-01006-5](https://doi.org/10.1007/s11214-023-01006-5).

Как цитировать эту статью:

Григорьев В.М., Ермакова Л.В. Эффекты скрученной магнитной трубки на стадии появления новой активной области в фотосфере. *Солнечно-земная физика.* 2025. Т. 11, № 1. С. 5–9. DOI: [10.12737/szf-111202501](https://doi.org/10.12737/szf-111202501).