



УДК 520.88:523.982

Математическое моделирование формирования предвспышечного сигнала в условиях солнечной атмосферы

Д. В. Романов¹, К. В. Романов¹, В. А. Романов²,
Е. А. Степанов², А. А. Лебедев², В. А. Маскаев²

¹ Красноярский государственный педагогический университет им. В. П. Астафьева, Россия, 660049, Красноярск, ул. Ады Лебедевой, 89.

² Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, 83.

Аннотация

В работе исследуется развитие неустойчивости Паркера в коротковолновой части спектра колебаний крупномасштабных магнитных полей (волновое число $m > 20$) в верхних слоях конвективной зоны Солнца. Вследствие резкой нелинейности подъема верхней части магнитной арки формируется иглообразный профиль, пронизывающий солнечную атмосферу с гиперзвуковой скоростью. При подъеме магнитного поля фотосферные слои и хромосфера испытывают резкий вертикальный удар, что приводит к генерации цуга круговых расходящихся ударных волн, распространяющихся вдоль солнечной поверхности. Данное явление уверенно регистрируется современными наблюдательными средствами и получило название «солнцетрясения». Начало генерации расходящихся ударных волн является предвестником вспышечной активности в пределах активной области солнечной атмосферы. В работе получены численные оценки пространственного и временного разрешения регистрирующей аппаратуры, необходимого для детального изучения подъема магнитного поля с гиперзвуковыми скоростями в хромосфере Солнца.

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
Научная статья

© Коллектив авторов, 2025

© СамГТУ, 2025 (составление, дизайн, макет)

 Контент публикуется на условиях лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

Образец для цитирования

Романов Д. В., Романов К. В., Романов В. А., Степанов Е. А., Лебедев А. А., Маскаев В. А. Математическое моделирование формирования предвспышечного сигнала в условиях солнечной атмосферы // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2025. Т. 29, № 2. С. 334–346. EDN: **NAFTRO**. DOI: [10.14498/vsgtu2140](https://doi.org/10.14498/vsgtu2140).

Сведения об авторах

Дмитрий Валерьевич Романов   <https://orcid.org/0000-0002-4982-5973>

кандидат физико-математических наук; доцент; каф. информатики и информационных технологий в образовании; e-mail: d-v-romanov@ya.ru

Константин Валерьевич Романов  <https://orcid.org/0000-0001-7320-2517>

кандидат физико-математических наук; доцент; каф. математики и методики обучения математике; e-mail: k-v-romanov@ya.ru

Валерий Александрович Романов  <https://orcid.org/0000-0001-9876-0822>

доктор физико-математических наук; профессор; каф. математической кибернетики и компьютерных наук; e-mail: valeriy.a.romanov@yandex.ru

Ключевые слова: фотосфера, солнечные пятна, конвективная зона Солнца, магнитная трубка, неустойчивость Паркера.

Получение: 26 декабря 2024 г. / Исправление: 31 марта 2025 г. /

Принятие: 28 апреля 2025 г. / Публикация онлайн: 9 июня 2025 г.

Введение. Вспышки на Солнце представляют собой наиболее мощное проявление солнечной активности [1–3]. Они оказывают значительное влияние на околоземное космическое пространство и магнитосферу Земли [4, 5]. Исследования, проводимые в рамках международных программ по изучению солнечно-земных связей, охватывают широкий спектр прикладных задач — от обеспечения безопасности космических миссий (защита оборудования и здоровья экипажа при длительных экспедициях) до медицинских аспектов (возможные осложнения сердечно-сосудистых заболеваний, онкологические риски и другие негативные последствия [6, 7]).

Ключевым элементом проводимых исследований является диагностика формирующихся активных областей солнечной атмосферы, которые служат очагами вспышечной активности. Особое значение имеет идентификация физических процессов (сигналов), предшествующих началу вспышечной активности в таких областях. Эти сигналы получили название «предвестников» [1, 6], причем их природа может быть различной.

Изучению «предвестников», исследованию их физической природы посвящено множество теоретических и наблюдательных работ [6–9]. Тем не менее проблема остается актуальной, поскольку до сих пор не установлены надежные физические критерии или явления, которые бы однозначно характеризовали начальную стадию вспышечного процесса и позволяли точно диагностировать предвспышечное состояние в формирующихся активных областях солнечной атмосферы [6, 7].

В данной работе для решения указанной задачи методом математического моделирования исследуется динамика выброса магнитного поля из верхних слоев конвективной зоны в солнечную атмосферу. Результаты расчетов демонстрируют наличие взрывных режимов нелинейного обострения при подъеме магнитного поля. Физическим механизмом, обеспечивающим нелинейный рост скорости подъема магнитного поля, является развитие неустойчивости Паркера в коротковолновой части спектра колебаний всплывающих магнитных полей в верхних слоях конвективной зоны Солнца. В работе детально анализируется динамика подъема магнитного поля от фотосферного уровня до верхних слоев хромосферы. Полученные результаты позволяют иденти-

Евгений Александрович Степанов  <https://orcid.org/0000-0002-2050-2724>
аспирант; каф. математической кибернетики и компьютерных наук;
e-mail: ev_stepanof@yandex.ru

Антон Андреевич Лебедев  <https://orcid.org/0000-0002-8241-1916>
аспирант; каф. математической кибернетики и компьютерных наук;
e-mail: maiorovaleks94@gmail.com

Владимир Алексеевич Маскаев  <https://orcid.org/0009-0000-3754-6902>
аспирант; каф. математической кибернетики и компьютерных наук;
e-mail: maskaev-01@mail.ru

фицировать физический механизм генерации интенсивных концентрических ударных волн, распространяющихся вдоль солнечной поверхности в очагах вспышечной активности и наблюдаемых экспериментально [10].

1. Математическая постановка задачи. Современные наблюдательные данные о зарождении и временной эволюции активных областей в солнечной атмосфере позволяют установить, что формирующиеся магнитные структуры представляют собой совокупность мелкомасштабных магнитных трубок с высокой напряженностью магнитного поля, расположенных в слабомагнитной плазме (рис. 1). Динамика тонкой магнитной трубки в конвективной зоне и атмосфере Солнца описывается следующей системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\rho_i \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{H}{4\pi} \cdot \frac{\partial(\vec{H})}{\partial\ell} + (\rho_i - \rho_e)\vec{g}, \quad (1)$$

$$p_i + \frac{H^2}{8\pi} = p_e, \quad (2)$$

$$\frac{\rho_i^\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{p_i}{\rho_i^\gamma} \right) = \text{div}(k \cdot \vec{\nabla}T) + Q_i, \quad (3)$$

$$H \cdot \sigma = \text{const} \quad (4)$$

$$\vec{\nabla}p_e = \rho_e \cdot \vec{g}, \quad (5)$$

$$p_i = \frac{R}{\mu} \cdot \rho_i \cdot T_i, \quad (6)$$

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\gamma - 1} \cdot \frac{p_i}{\rho_i}. \quad (7)$$

Здесь (1) — уравнение движения трубки с учетом силы натяжения магнитного поля и выталкивающей силы Архимеда; (2) — уравнение баланса давлений на границе трубки; (3) — уравнение энергии с учетом теплопроводности и радиационных потерь; (4) — условие сохранения магнитного потока; (5) — уравнение гидростатического равновесия для внешней плазмы; (6), (7) — уравнения состояния идеального газа. Индексы i и e обозначают параметры внутри и

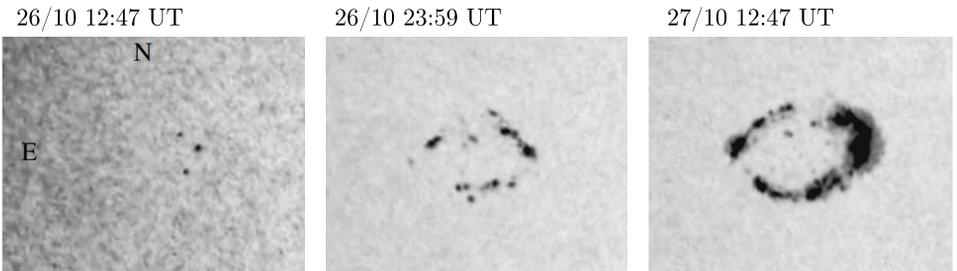


Рис. 1. Формирование группы пятен в активной области NOAA 10488 по изображениям в континууме SOHO MDI [13]

[Figure 1. Formation of a sunspot group in the active region of NOAA 10488 from images in the SOHO MDI continuum [13]]

вне трубки соответственно. В уравнениях введены следующие обозначения: H — напряженность магнитного поля [Гс]; ρ — плотность плазмы [$\text{г}/\text{см}^3$]; p — газовое давление [$\text{дин}/\text{см}^2$]; \vec{v} — скорость плазмы [$\text{см}/\text{с}$]; \vec{g} — ускорение свободного падения [$\text{см}/\text{с}^2$]; σ — площадь поперечного сечения трубки [см^2]; ℓ — координата вдоль оси магнитной трубки [см]; T — температура плазмы [К]; k — коэффициент теплопроводности [$\text{эрг}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{К})$]; Q_i — объемные потери энергии на излучение [$\text{эрг}/(\text{см}^3 \cdot \text{с})$]; γ — показатель адиабаты; $R = 8.314 \times 10^7$ — универсальная газовая постоянная [$\text{эрг}/(\text{К} \cdot \text{моль})$]; μ — молярная масса плазмы [$\text{г}/\text{моль}$]; ε — удельная внутренняя энергия [$\text{эрг}/\text{г}$]. Профили $\rho_e(r)$, $p_e(r)$, $g(r)$ определяются по стандартной модели внутреннего строения Солнца [11].

В начальный момент времени трубка расположена в экваториальной плоскости Солнца (рис. 2, а). Волновое число m соответствует количеству стоячих волн вдоль периметра трубки. В равновесном состоянии выталкивающая сила Архимеда компенсируется натяжением магнитных силовых линий. Вблизи положения равновесия возникают два типа линейных колебаний: быстрые (альфвеновские) и медленные (варикозные) моды (рис. 2, б). В гравитационном поле Солнца наименее устойчивыми являются медленные моды колебаний. При малых значениях напряженности магнитного поля области с повышенной плотностью опускаются вниз, тогда как разреженные участки, теряя массу, под действием архимедовой силы ускоренно всплывают к фотосфере и в атмосферу Солнца. Данный механизм описывает развитие неустойчивости Паркера для медленных мод колебаний магнитного поля в конвективной зоне.

Для численного решения системы уравнений (1)–(7) вводится лагранжева массовая координата s , определяющая массу вещества между фиксированным начальным и текущим сечениями трубки [12]. Система уравнений в безразмерных массовых лагранжевых переменных аппроксимируется разностными схемами и разделяется на три группы: уравнения для координат узлов трубки, динамические и тепловые уравнения. Полученная нелинейная система разностных уравнений решается неявным методом Ньютона с использованием процедуры отдельных прогонок [12].

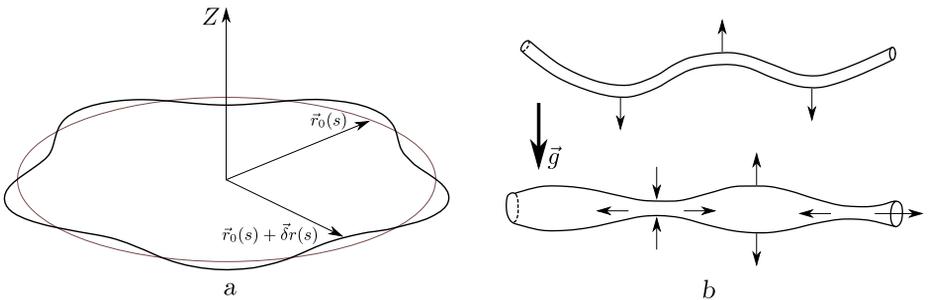


Рис. 2. Начальная форма магнитной трубки для волнового числа $m = 5$ (а); течение плазмы в трубке для изгибающей (быстрой) и продольной (медленной) мод колебаний (б)
 [Figure 2. The initial shape of the magnetic tube for the wavenumber $m = 5$ (a); plasma flow in a tube for bending (fast) and longitudinal (slow) oscillation modes (b)]

2. Физические условия развития неустойчивости Паркера в верхних слоях конвективной зоны Солнца. Развитие неустойчивости Паркера для колебаний магнитной трубки проявляется по-разному в зависимости от глубины ее залегания в конвективной зоне. На рис. 3, а представлены распределения газодинамических параметров на различных глубинах конвективной зоны, полученные в рамках программы GONG [11]. В верхних слоях конвективной зоны (на глубинах менее 10^5 км от фотосферного уровня, где радиус Солнца составляет 695 500 км) формируется область с высокими градиентами газодинамических параметров. При уменьшении глубины погружения равновесные положения магнитной трубки становятся менее устойчивыми. Ключевым параметром устойчивости является длина волны (характеризуемая волновым числом m): с увеличением длины волны области повышенной плотности в трубке под действием гравитации легче опускаются вниз, что приводит к развитию неустойчивости Паркера. При больших значениях волнового числа m устойчивые конфигурации магнитного поля формируются вблизи фотосферного уровня (рис. 3, б).

Для гармоника $m = 20$ глубина потери устойчивости составляет 52 394 км ниже фотосферного уровня при начальной напряженности магнитного поля $H = 2 \cdot 10^6$ Гс. При всплывании магнитной арки все участки трубки динамически эквивалентны: газ поступает в некоторый объем с одной стороны и вытекает с другой. Особый интерес представляет верхняя точка арки, где газ вытекает через оба боковых сечения сегмента трубки.

В этой области создаются оптимальные условия для развития неустойчивости Паркера, что приводит к нелинейному росту скорости подъема вершины арки (рис. 4, 5). Вершина приобретает иглообразную форму, причем степень заостренности напрямую влияет на эффективность стекания газа под действием гравитации и, следовательно, на развитие неустойчивости.

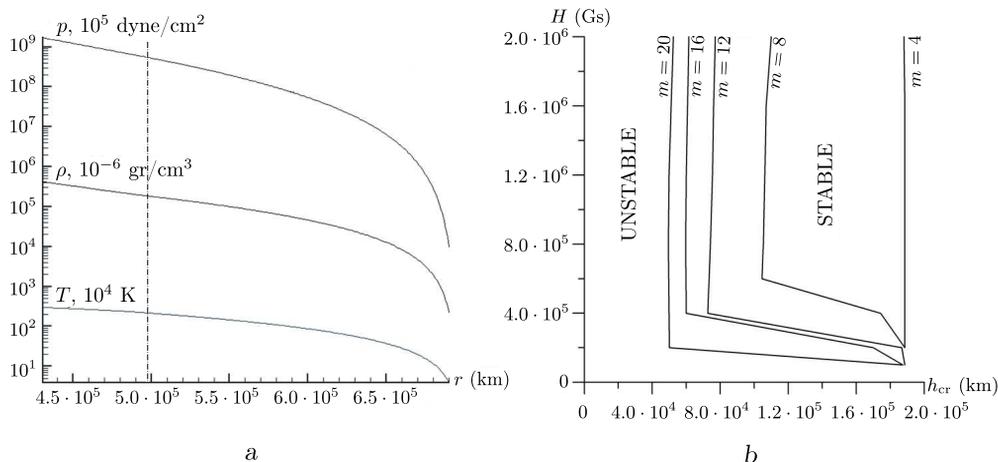


Рис. 3. Распределение газодинамических параметров в зависимости от глубины конвективной зоны [11] (а); распределение критических значений напряженности магнитного поля развития неустойчивости Паркера в зависимости от глубины конвективной зоны и волнового числа m (б)

[Figure 3. Distribution of gas-dynamic parameters depending on the depth of the convective zone [11] (a); distribution of critical values of the magnetic field strength for the development of the Parker instability depending on the depth of the convective zone and the wave number m (b)]

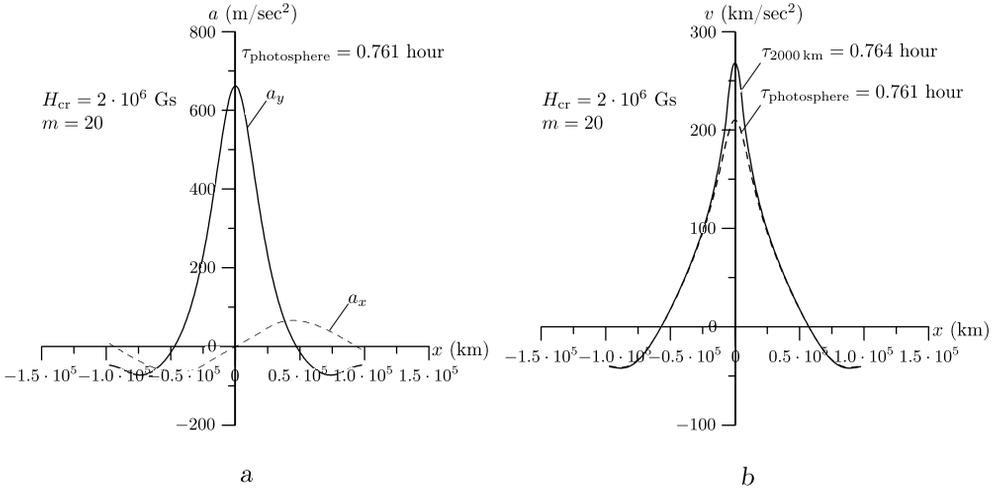


Рис. 4. Распределение вертикального и горизонтального ускорений магнитной трубки (а); распределение вертикальной скорости подъема трубки при выходе на фотосферный уровень и в верхние слои хромосферы (b)

[Figure 4. Distribution of vertical and horizontal accelerations of the magnetic flux tube (a); vertical velocity distribution during the tube's ascent through the photospheric level and into the upper chromospheric layers (b)]

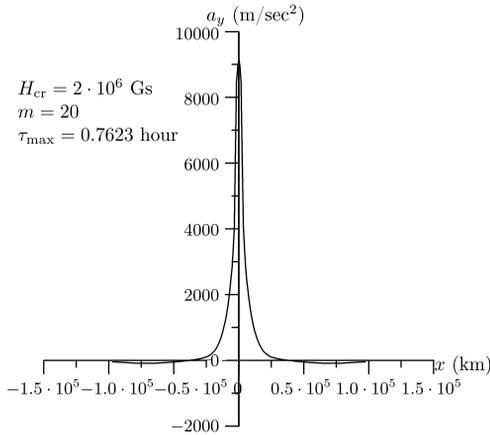


Рис. 5. Распределение вертикального ускорения магнитной трубки в верхних слоях хромосферы

[Fig. 5. Distribution of vertical acceleration of the magnetic flux tube in the upper chromospheric layers]

Начальная стадия неустойчивости (рис. 4–6) характеризуется классическим механизмом: газ стекает к основанию арки, а центральная часть, непрерывно теряя массу, ускоряется по направлению к фотосфере. Возрастающие температурные градиенты вдоль оси трубки вызывают усиление тепловых потоков от основания к вершине. Для трубки с радиусом сечения 1 км при срыве тепловые потоки достигают $3 \cdot 10^{29}$ эрг/с (рис. 6, b), что достаточно для обеспечения энергии типичной солнечной вспышки ($\sim 10^{32}$ эрг, [1, 2]). Несмотря на малую начальную глубину ($\lambda \approx 2 \cdot 10^5$ км), на нелинейной стадии вершина арки приобретает ускорение до 600 м/с^2 (рис. 4, a) и скорость подъема 200 км/с (рис. 4, b).

Основная стадия разгона магнитной трубки реализуется при подъеме в пределах хромосферы Солнца. В верхних слоях хромосферы реализуется взрывной режим развития неустойчивости Паркера. Максимальное значение

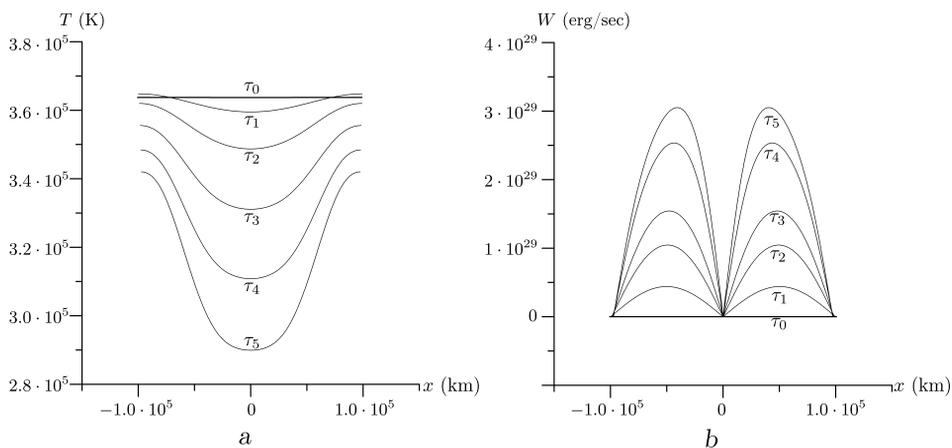


Рис. 6. Распределения температуры (а) и тепловых потоков (б) при подъеме магнитной трубки к фотосферному уровню: $\tau_0 = 0$, $\tau_1 = 32$ мин, $\tau_2 = 38$ мин, $\tau_3 = 42$ мин, $\tau_4 = 43$ мин, $\tau_5 = 44$ мин

[Figure 6. Distributions of temperature (a) and heat fluxes (b) during the magnetic flux tube's ascent to the photospheric level: $\tau_0 = 0$, $\tau_1 = 32$ min, $\tau_2 = 38$ min, $\tau_3 = 42$ min, $\tau_4 = 43$ min, $\tau_5 = 44$ min]

вертикального ускорения достигает величины 8000 м/сек^2 , что почти на два порядка превышает величину ускорения свободного падения на поверхности Солнца (рис. 5). Скорость подъема достигает значений около 300 км/с , что на порядок превышает значение местной скорости звука ($M \simeq 12$). Вершина всплывающей «иглы» резко заостряется: полуширина графика вертикального ускорения снижается от значения $20\,000 \text{ км}$ на фотосферном уровне до значений порядка 10^3 км в верхних слоях хромосферы (рис. 5). Также на порядок понижается значение полуширины графика вертикальной скорости подъема по отношению к фотосферному уровню (рис. 4, b).

В результате нелинейного роста скорости верхней части арочной магнитной структуры при развитии нелинейной фазы неустойчивости Паркера фотосферные и, в большей степени, хромосферные слои испытывают резкий вертикальный удар, сила которого пропорциональна ускорению всплывающей верхней части магнитной арки (рис. 5). Полуширина профиля распределения вертикального ускорения на фотосферном уровне составляет порядка 1000 км — распределение носит сингулярный характер. Горизонтальное ускорение магнитной трубки на фотосферном уровне определяется силами натяжения магнитного поля и практически отсутствует (рис. 4, а). При достижении фотосферного уровня трубка успевает разогнаться до гиперзвуковых скоростей подъема (рис. 4, b). В результате фотосфера (и особенно хромосфера) испытывают мощный вертикальный удар, сконцентрированный на малой площади и производимый заостренным телом, движущимся с гиперзвуковой скоростью. От места воздействия удара отходят сильные концентрические ударные волны, распространяющиеся вдоль солнечной поверхности. Эти волны современными наблюдательными средствами уверенно регистрируются (рис. 7) и получили название «солнцетрясений» [10].

В верхних слоях хромосферы Солнца на высотах порядка 2000 км от фотосферного уровня реализуется нелинейный рост температуры из-за эффекта

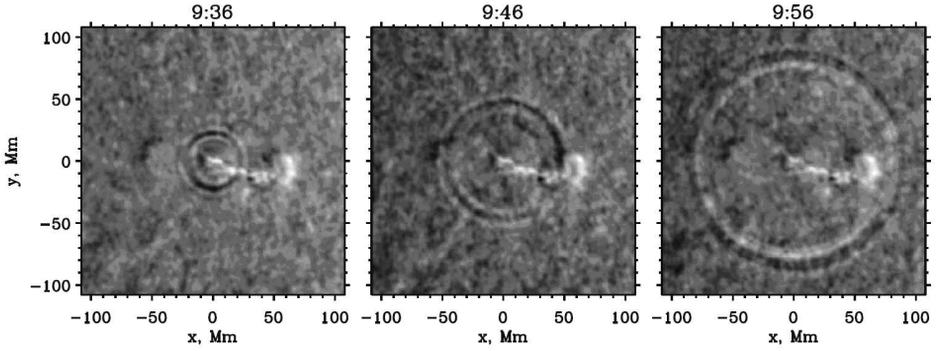


Рис. 7. Генерация концентрических ударных волн в солнечной хромосфере и на фотосферном уровне («солнцетрясение»)

[Figure 7. Generation of concentric shock waves in the solar chromosphere and photospheric level (“sunquake”)]

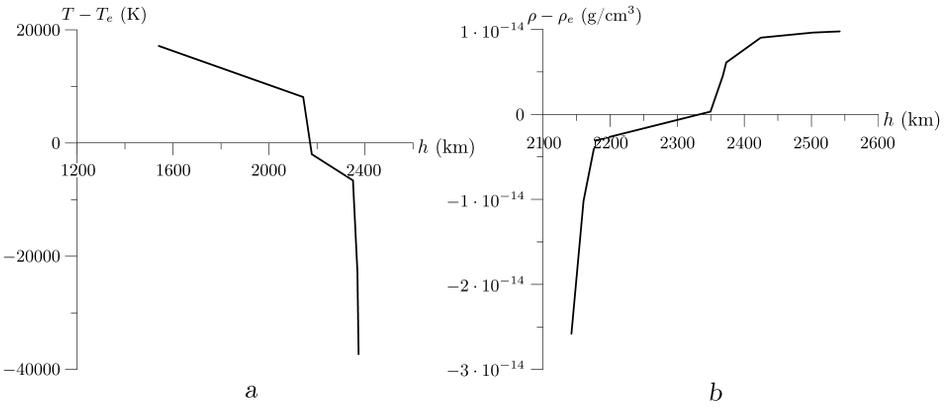


Рис. 8. Разность температур (a) и плотностей газа (b) внутри и снаружи магнитной трубки в верхних слоях хромосферы

[Figure 8. Temperature difference (a) and gas density contrast (b) inside and outside the magnetic flux tube in the upper chromospheric layers]

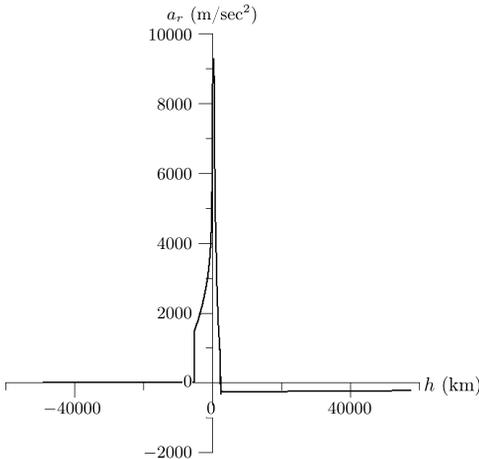


Рис. 9. Распределение вертикального ускорения верхней точки арочной магнитной структуры в зависимости от высоты подъема в солнечной атмосфере

[Figure 9. Vertical acceleration distribution of the apex of an arched magnetic structure as a function of ascent height in the solar atmosphere]

аномального прогрева солнечной атмосферы [8]. На этих высотах нелинейно резко растет температура и падает плотность газа. Как следствие, разности температур и плотностей газа внутри и снаружи магнитной трубки меняют знак (рис. 8). Выталкивающая сила Архимеда исчезает, и ускорение магнитной трубки становится отрицательным (рис. 9). Силовое воздействие всплывающего магнитного потока на солнечную атмосферу прекращается.

Заключение. Феномен выброса магнитных полей с гиперзвуковыми скоростями в солнечную хромосферу представляет принципиальную важность для анализа физических процессов, сопровождающих хромосферные вспышки [3]. Непосредственная регистрация процесса выброса магнитного поля в хромосферу затруднена ограничениями пространственно-временного разрешения наблюдательных данных. Характерный диапазон глубин формирования спектральных линий в хромосфере составляет порядка 100 км [1]. Магнитная трубка, поднимающаяся со скоростью 300 км/с (рис. 4, b), преодолевает область чувствительности спектральных линий менее чем за 0.1 сек, что существенно превышает возможности временного разрешения современной наблюдательной аппаратуры [7].

В аспекте пространственного разрешения ситуация более благоприятная. На стадии взрывного ускорения магнитной трубки формируется очень узкий профиль вертикального ускорения с полушириной порядка 1000 км (рис. 5). Этот параметр определяет требуемое пространственное разрешение для регистрации вспышечных процессов в солнечной атмосфере. Современные наблюдательные системы успешно решают эту задачу, что позволило получить фундаментальные результаты в исследовании механизмов хромосферных вспышек [7, 10].

Решение проблемы временного разрешения при регистрации подъема магнитного поля по ансамблю спектральных линий, формирующихся от фотосферы до верхней хромосферы, позволит детально исследовать динамику магнитных полей в нижних слоях солнечной атмосферы и, в перспективе, полностью объяснить механизмы формирования энергетических потоков во вспышечных событиях. Это также разрешает проблему триггерного механизма инициирования вспышек [1, 3], который является следствием неустойчивости Паркера для крупномасштабных магнитных полей в верхних слоях конвективной зоны Солнца.

Ключевой результат настоящего исследования заключается в установлении того факта, что начало генерации концентрических ударных волн, распространяющихся вдоль солнечной поверхности (рис. 7), предшествует старту вспышечных процессов в активной области. Данное явление по своей физической природе представляет собой достоверный «предвестник» вспышечной активности.

Конкурирующие интересы. Авторы не имеют конфликта интересов по материалам представленной работы.

Авторский вклад и ответственность. К.В. Романов — концепция исследования; математическая и физическая постановка задачи; разработка численного алгоритма (метод циклических отдельных прогонов для магнитной трубки с импульсными тепловыми потоками); интерпретация результатов; подготовка первоначального варианта статьи. Д.В. Романов — соавторство в постановке задачи; разработка числен-

ного алгоритма; тестирование программного комплекса (тепловая и динамическая группы уравнений); анализ литературы; финальная редакция статьи. В.А. Романов — участие в физической постановке; аналитические тесты для тепловой и динамической групп (различные граничные условия и режимы вращения); анализ астрофизических данных; финальная редакция. Е.А. Степанов — реализация численного алгоритма; тестирование программного комплекса (проверка порядка аппроксимации); проведение всех расчетов; представленных в статье; финальная редакция. А.А. Лебедев — разработка программного комплекса; тестовые расчеты; сравнительный анализ численных методов; проведение всех расчетов; финальная редакция. В.А. Маскаев — разработка программного комплекса; тестовые расчеты; анализ численных подходов в литературе; проведение всех расчетов; финальная редакция. Авторы несут полную ответственность за предоставление окончательной рукописи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

Финансирование. Работа выполнена на базе бюджетного финансирования.

Благодарность. Авторы благодарят Л.В. Ермакову (Институт солнечно-земной физики СО РАН) за предоставленные наблюдательные данные по зарождению активных областей, А.Г. Косовичева (Крымская астрофизическая обсерватория РАН) за предоставленные данные по внутреннему строению Солнца из проекта GONG.

Библиографический список

1. Svestka Z. *Solar Flares*. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publ. Comp., 1976. 384 pp.
2. Smith H. J., Smith E. P. *Solar Flares*. N.Y.: Macmillan Co., 1963. 334 pp.
3. Сомов Б. В. Проблемы физики солнечных вспышек / *Проблемы физики солнечных вспышек*. М.: ИЗМИРАН, 1983. С. 5–51.
4. Пудовкин М. И., Чертков А. Д. Эффективность солнечных вспышек // *Докл. АН СССР*, 1971. Т. 201, № 1. С. 75–77.
5. Чертков А. Д. Геомагнитная активность на спаде солнечных циклов / *Суббури и возмущения в магнитосфере*. Л.: Наука, 1975. С. 283–299.
6. *Solar Activity Observations and Predictions* / ed. P. S. McIntosh, M. Dryer. Cambridge: MIT Press, 1972. xv+444 pp.
7. Северный П. Б. *Некоторые проблемы физики Солнца*. М.: Наука, 1988. 220 с.
8. Priest E. R. *Solar Magnetohydrodynamics* / Geophysics and Astrophysics Monographs. vol. 21. Dordrecht: Springer, 1982. xix+469 pp. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-7958-1>.
9. Parker E. N. *Cosmical Magnetic Fields. Their Origin and their Activity* / The International Series of Monographs on Physics. Oxford: Clarendon Press, 1979. xvii+841 pp.
10. Kosovichev A. G., Zharkova V. V. Observation of seismic effects of solar flares from the SOHO Michelson Doppler Imager / *Symposium – International Astronomical Union*. vol. 185 (Kyoto, Japan, 18–22 August, 1997), New Eyes to See Inside the Sun and Stars, 1998. pp. 191–194. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0074180900238606>.
11. Christensen-Dalsgaard J., Däppen W., Ajukov S. V., et al. The current state of Solar modeling // *Science*, 1996. vol. 272, no. 5266. pp. 1286–1292. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.272.5266.1286>.
12. Степанов Е. А., Майоров А. О., Романов К. В. [и др.] Математическое моделирование развития неустойчивости Паркера крупномасштабных колебаний магнитных полей в конвективной зоне Солнца // *Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика*, 2021. Т. 21, № 2. С. 106–115. EDN: DZYVVB. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-2-106-115>.
13. Grigor'ev V. M., Ermakova L. V., Khlystova A. I. Emergence of magnetic flux at the solar surface and the origin of active regions // *Astron. Rep.*, 2009. vol. 53, no. 9. pp. 869–878. EDN: MWTYGB. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063772909090108>.

MSC: 85A30, 85A20

Mathematical modeling of pre-llare signal formation in the solar atmosphere

*D. V. Romanov*¹, *K. V. Romanov*¹, *V. A. Romanov*²,
*E. A. Stepanov*², *A. A. Lebedev*², *V. A. Maskaev*²

¹ Krasnoyarsk State Pedagogical University,
89, Ada Lebedeva st., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation.

² Saratov State University,
83, Astrakhanskaya st., Saratov, 410012, Russian Federation.

Abstract

This study is devoted to the development of Parker instability in the short-wavelength range of large-scale magnetic field oscillations (wavenumber $m > 20$) within the upper layers of the solar convective zone. The strongly nonlinear ascent of the magnetic arc's apex forms a needle-like structure that penetrates the solar atmosphere at hypersonic velocities. During the magnetic field's rise, photospheric and chromospheric layers experience an abrupt vertical impact, generating a train of circular diverging shock waves propagating along the solar surface. This phenomenon, reliably detected by modern observational instruments, is called as a “sunquake”. The onset of diverging shock wave generation serves as a precursor to flare activity within the active region. The paper provides numerical estimates for the spatial and temporal resolution requirements of observational instrumentation needed to study hypersonic magnetic flux emergence in the solar chromosphere.

Keywords: photosphere, sunspots, solar convective zone, magnetic flux tube, Parker instability.

Mathematical Modeling, Numerical Methods and Software Complexes Research Article

© The Author(s), 2025

© Samara State Technical University, 2025 (Compilation, Design, and Layout)

 The content is published under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 International License](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Please cite this article in press as:

Romanov D. V., Romanov K. V., Romanov V. A., Stepanov E. A., Lebedev A. A., Maskaev V. A. Mathematical modeling of pre-llare signal formation in the solar atmosphere, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.], 2025, vol. 29, no. 2, pp. 334–346. EDN: [NAFTRO](https://nfdi.org/urn:nbn:de:hbz:5:1-65887-p0011-7). DOI: [10.14498/vsgtu2140](https://doi.org/10.14498/vsgtu2140) (In Russian).

Authors' Details:

Dmitry V. Romanov  <https://orcid.org/0000-0002-4982-5973>

Cand. Phys. & Math. Sci.; Associate Professor; Dept. of Computer Science and Information Technology in Education; e-mail: d-v-romanov@ya.ru

Konstantin V. Romanov  <https://orcid.org/0000-0001-7320-2517>

Cand. Phys. & Math. Sci.; Associate Professor; Dept. of Mathematics and Methods of Teaching Mathematics; e-mail: k-v-romanov@ya.ru

Valery A. Romanov  <https://orcid.org/0000-0001-9876-0822>

Dr. Phys. & Math. Sci.; Professor; Dept. of Mathematical Cybernetics and Computer Science; e-mail: valeriy.a.romanov@yandex.ru

Received: 26th December, 2024 / Revised: 31st March, 2025 /

Accepted: 28th April, 2025 / First online: 9th June, 2025

Competing Interests. The authors declare no competing interests regarding the materials presented in this work.

Author contributions and responsibilities. K.V. Romanov: Research conception; Mathematical and physical formulation of the problem; Development of numerical algorithm (cyclic sweep method for magnetic flux tube with impulsive heat flows); Results interpretation; Initial draft preparation. D.V. Romanov: Co-authorship in problem formulation; Numerical algorithm development; Software testing (thermal and dynamic equation groups); Literature review; Final manuscript editing. V.A. Romanov: Participation in physical formulation; Analytical tests for thermal and dynamic groups (various boundary conditions and rotation regimes); Astrophysical data analysis; Final editing. E.A. Stepanov: Numerical algorithm implementation; Software testing (verification of approximation order); Execution of all presented calculations; Final editing. A.A. Lebedev: Software development; Test calculations; Comparative analysis of numerical methods; Execution of all calculations; Final editing. V.A. Maskaev: Software development; Test calculations; Analysis of numerical approaches in literature; Execution of all calculations; Final editing. The authors bear full responsibility for submitting the final manuscript for publication. The final version of the manuscript was approved by all authors.

Funding. The work was performed within the framework of state budget funding.

Acknowledgments. The authors thank L.V. Ermakova (Institute of SolarTerrestrial Physics, Siberian Branch of the RAS) for providing observational data on active region formation, and A.G. Kosovichev (Crimean Astrophysical Observatory, RAS) for solar interior structure data from the GONG project.

References

1. Svestka Z. *Solar Flares*. Dordrecht, Holland, D. Reidel Publ. Comp., 1976, 384 pp.
2. Smith H. J., Smith E. P. *Solar Flares*. N.Y., Macmillan Co., 1963, 334 pp.
3. Somov B. V. Problems of solar flare physics, In: *Problemy fiziki solnechnykh vspyshek* [Problems of Solar Flare Physics]. Moscow, IZMIRAN, 1983, pp. 5–51 (In Russian).
4. Pudovkin M. I., Chertkov A. D. Efficiency of solar flares, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1971, vol. 201, no. 1, pp. 75–77 (In Russian).
5. Chertkov A. D. Geomagnetic activity during solar cycle decline, In: *Subburi i voz-mushcheniya v magnitosfere* [Substorms and Magnetospheric Disturbances]. Leningrad, Nauka, 1975, pp. 283–299 (In Russian).
6. *Solar Activity Observations and Predictions*, ed. P. S. McIntosh, M. Dryer. Cambridge, MIT Press, 1972, xv+444 pp.

Evgeny A. Stepanov  <https://orcid.org/0000-0002-2050-2724>

Postgraduate Student; Dept. of Mathematical Cybernetics and Computer Science;
e-mail: ev_stepanof@yandex.ru

Anton A. Lebedev  <https://orcid.org/0000-0002-8241-1916>

Postgraduate Student; Dept. of Mathematical Cybernetics and Computer Science;
e-mail: maiorovaleks94@gmail.com

Vladimir A. Maskaev  <https://orcid.org/0009-0000-3754-6902>

Postgraduate Student; Dept. of Mathematical Cybernetics and Computer Science;
e-mail: maskaev-01@mail.ru

7. Severny P. B. *Nekotoryye problemy fiziki Solntsa* [Some Problems of Solar Physics]. Moscow, Nauka, 1988, 220 pp. (In Russian)
8. Priest E. R. *Solar Magnetohydrodynamics*, Geophysics and Astrophysics Monographs, vol. 21. Dordrecht, Springer, 1982, xix+469 pp. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-7958-1>.
9. Parker E. N. *Cosmical Magnetic Fields. Their Origin and their Activity*, The International Series of Monographs on Physics. Oxford, Clarendon Press, 1979, xvii+841 pp.
10. Kosovichev A. G., Zharkova V. V. Observation of seismic effects of solar flares from the SOHO Michelson Doppler Imager, In: *Symposium – International Astronomical Union*, vol. 185 (Kyoto, Japan, 18–22 August, 1997), *New Eyes to See Inside the Sun and Stars*, 1998, pp. 191–194. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0074180900238606>.
11. Christensen-Dalsgaard J., Däppen W., Ajukov S. V., et al. The current state of Solar modeling, *Science*, 1996, vol. 272, no. 5266, pp. 1286–1292. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.272.5266.1286>.
12. Stepanov E. A., Mayorov A. O., Romanov K. V., et al. Mathematical modeling of the Parker’s instability development of large-scale vibrations of magnetic fields in the sun convective zone, *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 106–115 (In Russian). EDN: DZYYVB. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-2-106-115>.
13. Grigor’ev V. M., Ermakova L. V., Khlystova A. I. Emergence of magnetic flux at the solar surface and the origin of active regions, *Astron. Rep.*, 2009, vol. 53, no. 9, pp. 869–878. EDN: MWTYGB. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063772909090108>.