

УДК 523.98, 533.951

ГЕНЕРАЦИЯ СИЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН ИЗ ПОДФОТОСФЕРНОГО УРОВНЯ И ВЫБРОС МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В СОЛНЕЧНУЮ АТМОСФЕРУ В ЭПОХУ МАКСИМУМА АКТИВНОСТИ ЦИКЛА

¹В.Г. Еселевич, ¹М.В. Еселевич, ²Н.В. Кучеров, ²В.А. Романов, ²Д.В. Романов, ²К.В. Романов, ²И.В. Семенов

GENERATION OF STRONG SHOCK WAVES IN THE SUBPHOTOSPHERE AND EJECTION OF MAGNETIC FIELDS INTO THE SOLAR ATMOSPHERE AT SOLAR MAXIMUM

¹V.G. Eselevich, ¹M.V. Eselevich, ²N.V. Kucherov, ²V.A. Romanov, ²D.V. Romanov, ²K.V. Romanov, ²I.V. Semyonov

В работе приведены сводные характеристики параметров генерации слабых ударных волн при развитии неустойчивости Паркера в диапазоне $0 \leq H_{cr} \leq 2 \cdot 10^6$ Гс; $1 \leq m \leq 8$. Исследуется выброс магнитных полей в хромосферу Солнца при развитии неустойчивости Паркера в диапазоне $16 \leq m \leq 28$; $H_{cr} = 2 \cdot 10^6$ Гс.

In this paper provides a summary of the characteristics of generation parameters of weak shock waves in the development of Parker's instability in the following range $0 \leq H_{cr} \leq 2 \cdot 10^6$ Gs; $1 \leq m \leq 8$. We study the emission of magnetic fields in the chromosphere of the Sun in the development of Parker's instability in the following range $16 \leq m \leq 28$; $H_{cr} = 2 \cdot 10^6$ Gs.

Всплытие магнитных полей с различных глубин конвективной зоны в солнечную атмосферу целиком определяет феномен активности Солнца [Еселевич и др., 2011]. Это утверждение можно сформулировать более конкретно: развитие неустойчивости Паркера [Parker, 1984] колебаний магнитных полей на разных глубинах конвективной зоны определяет все многообразие физических процессов и явлений, протекающих в атмосфере Солнца на различных стадиях цикла солнечной активности. Для иллюстрации и частичного обоснования этого утверждения в настоящей работе исследуется развитие неустойчивости медленной волны (неустойчивости Паркера) в нелинейной фазе в двух крайних спектральных диапазонах: в низкочастотном диапазоне ($1 \leq m \leq 8$) и высокочастотном диапазоне ($m > 20$). При колебаниях с низкими частотами неустойчивость Паркера позволяет обнаружить стабильный устойчивый механизм генерации слабых ударных волн на фотосферном уровне в эпоху минимума активности цикла. Этот результат завершает исследования, начатые в работе [Еселевич и др., 2011]. При колебаниях с высокой частотой неустойчивость Паркера характеризуется механизмом выброса плазмы с «вмороженным» магнитным полем в солнечную атмосферу со сверхзвуковыми скоростями [Eselevich, Eselevich, 2003] и позволяет исследовать начальную фазу ускорения быстрых СМЕ в нижних слоях солнечной атмосферы [Eselevich, Eselevich, 2003]. Эти крайние случаи демонстрируют возможности (диапазон) генерации активных явлений в солнечной атмосфере за счет развития неустойчивости Паркера колебаний магнитных полей в конвективной зоне. Сразу отметим, что физически самый содержательный диапазон колебаний – промежуточный ($10 \leq m \leq 20$). В этом диапазоне развитие неустойчивости Паркера приводит к зарождению активных областей в солнечной атмосфере. Но данное исследование выходит за рамки настоящей работы.

Сводные характеристики нелинейных колебаний магнитных полей в низкочастотном диапазоне ($1 \leq m \leq 8$)

Детальный физический анализ нелинейных колебаний магнитных полей в конвективной зоне,

проведенный в работе [Еселевич и др., 2011], позволяет выделить наиболее важные физические параметры, определяющие генерацию слабых ударных волн на фотосферном уровне:

1. Глубина срыва (развития неустойчивости Паркера) магнитного поля.
2. Глубина достижения максимальной скорости подъема магнитных полей.
3. Глубина полного торможения (поворотная точка) магнитного поля.
4. Абсолютная величина максимальной скорости подъема магнитного поля.

Для генерации ударных волн важно не абсолютное значение скорости подъема, а величина скорости подъема в сравнении с местной скоростью звука [Прист, 1982]. Поэтому далее скорость приводится в числах Маха M .

В конвективной зоне скорость звука при приближении к фотосферному уровню нелинейно падает [Christensen-Dalsgaard et al., 1996]. Соответственно глубины абсолютной максимальной скорости подъема и максимальной скорости подъема в числах Маха не совпадают. Добавляется еще один физический параметр:

5. Глубина достижения максимальной скорости в единицах местной скорости звука.

Это полный список физических параметров колебаний, определяющих генерацию ударных волн на фотосферном уровне всплывающими магнитными полями.

На рис. 1 приведены распределения выделенных параметров в зависимости от напряженности магнитного поля трубки на глубине развития неустойчивости Паркера в начальный момент времени для гармоники $m=2$. Характерные особенности представленных распределений следующие: глубина потери устойчивости поля равна $h = -188\,000$ км и от напряженности поля в диапазоне $0 \leq H \leq 2 \cdot 10^6$ Гс практически не зависит (рис. 1, а).

Глубины максимальной скорости подъема $h_{V_{max}}$, максимальной скорости подъема в числах Маха $h_{V_{max}M}$, верхней поворотной точки h_{min} от напряженности поля в диапазоне $0 \leq H \leq 2 \cdot 10^6$ Гс также практи-

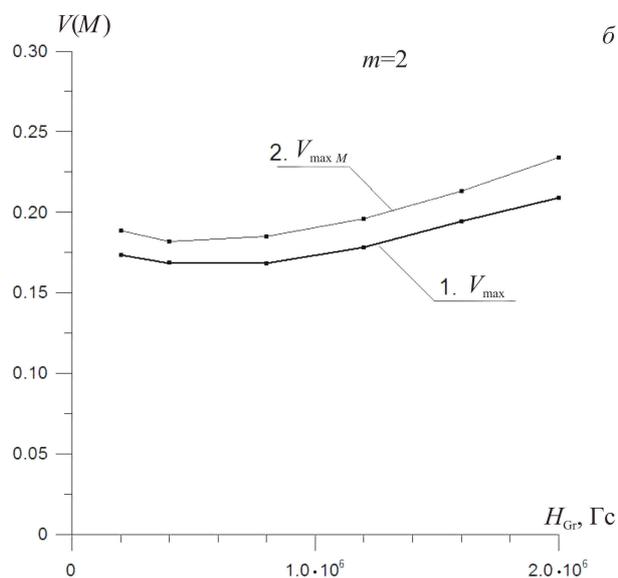
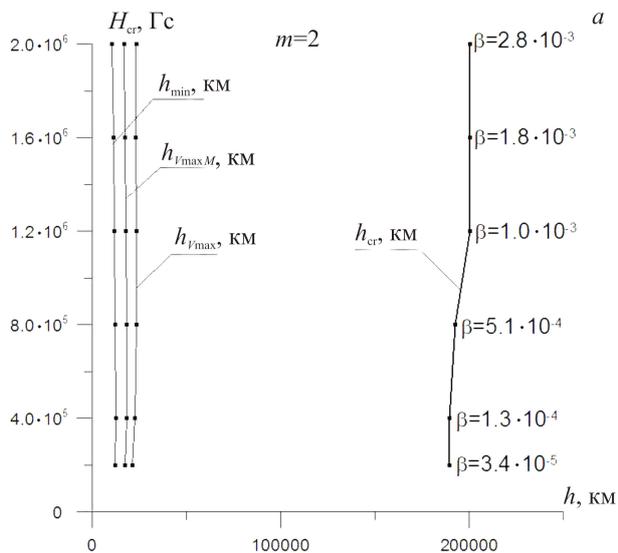


Рис. 1. Распределения в зависимости от начальной напряженности поля (H_{cr}) глубины развития неустойчивости Паркера (h_{cr}), глубины максимальной скорости подъема ($h_{V_{max}}$), глубины максимальной скорости подъема в числах Маха ($h_{V_{maxM}}$), глубины точки полного торможения (h_{min}) (а); абсолютной скорости подъема (V_{max}) и в числах Маха (V_{maxM}) в единицах местной скорости звука (б) при $m=2$.

чески не зависят. Максимальные значения скорости подъема (рис. 1, б) V_{max} , V_{maxM} с увеличением напряженности поля слабо растут. В числах Маха (рис. 1, б) эта тенденция выражена более ярко. Но в целом максимальные скорости подъема существенно меньше дозвуковых ($V_{max} \approx 0.18 M$, $V_{maxM} \approx 0.20 M$).

Результаты расчетов показали, что в диапазоне $1 \leq m \leq 6$ представленные распределения практически совпадают с распределениями на рис. 1. Следовательно, в диапазоне $1 \leq m \leq 6$ параметры генерации ударных волн от напряженности поля и частоты колебаний не зависят.

Это важный физический результат: всплывающие магнитные поля из-за неустойчивости Паркера генерируют ударные волны в стабильном режиме независимо от напряженности поля и частоты колебаний в указанном диапазоне.

С ростом волнового числа ($m=8$, рис. 2) режимы генерации слабых ударных волн меняются. Глубина потери устойчивости с ростом напряженности поля резко сдвигается к фотосферному уровню (рис. 2, а). Сохраняется стабильность (неизменность) глубины достижения максимальных скоростей подъема и поворотных точек. Значения максимальной скорости подъема с ростом напряженности поля нелинейно растут, оставаясь дозвуковыми (рис. 2, б). В диапазоне $1 \leq m \leq 8$ реализуются существенно дозвуковые режимы всплывания без выноса магнитных полей в солнечную атмосферу.

Генерация сильных ударных волн и вынос магнитных полей в солнечную атмосферу со сверхзвуковыми скоростями

Верхние поворотные точки располагаются во всех режимах колебаний для $m \leq 16$ ниже фотосферного уровня (рис. 3, а). С $m=16$ начинается линейный рост, и при $m \geq 20$ магнитные поля выбрасываются прямо в солнечную атмосферу с высокими сверхзвуковыми скоростями (рис. 3, б). При $m \leq 28$ скорость выброса может превышать 60 км/с, а число Маха приближается к $M=8$. Глубины достижения макси-

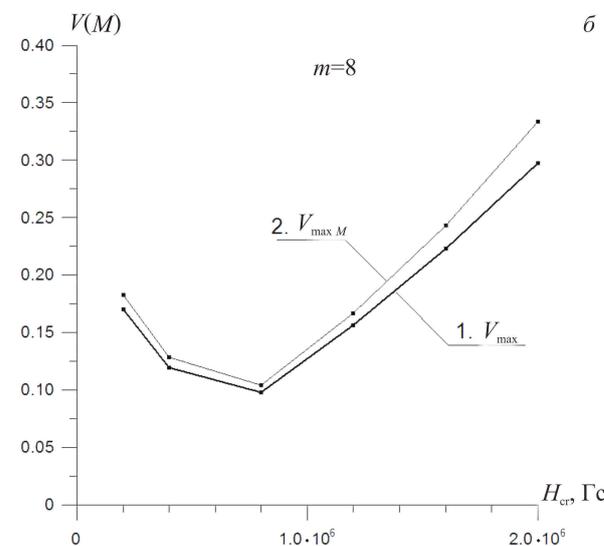
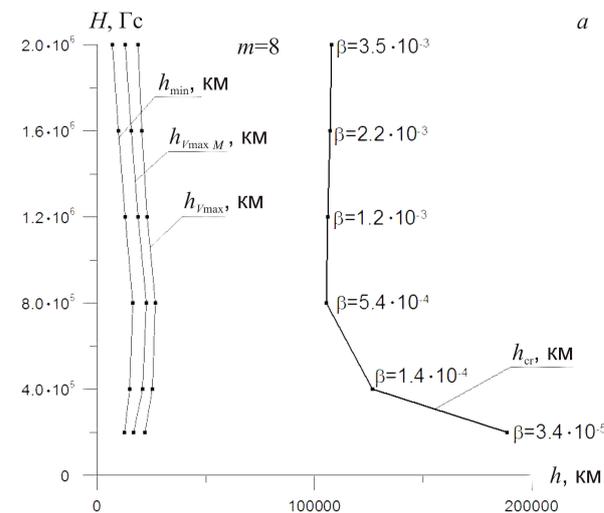


Рис. 2. Распределения в зависимости от H_{cr} параметров генерации слабых ударных волн (рис. 1) при $m=8$.

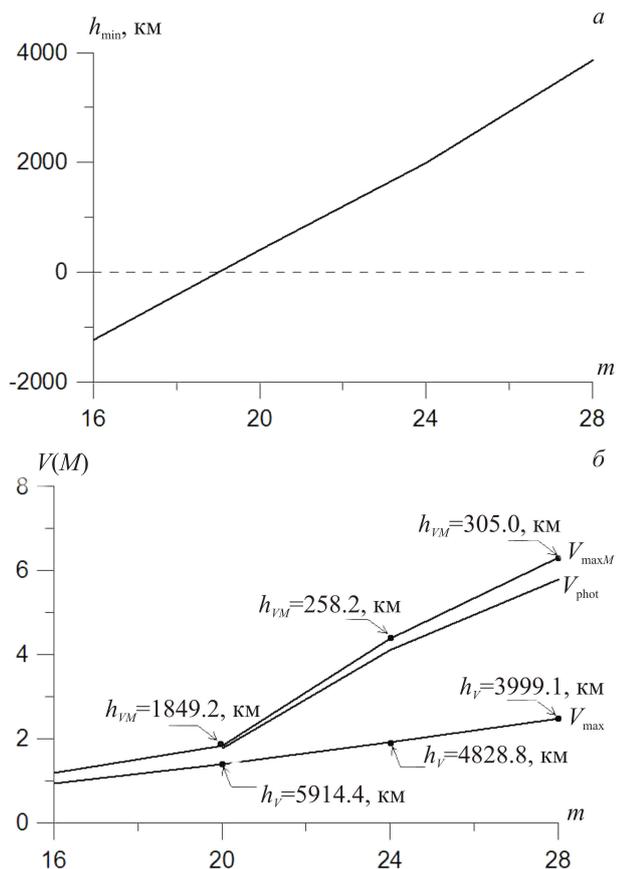


Рис. 3. Распределения глубин верхних поворотных точек h_{\min} (а), фотосферной скорости V_{phot} , максимальной скорости подъема V_{\max} , максимальной скорости подъема в числах Маха $V_{\max M}$ в зависимости от волнового числа m при $H_{\text{cr}}=2 \cdot 10^6$ Гс (б).

максимальной скорости в числах Маха расположены выше фотосферного уровня в хромосфере Солнца (рис. 3, б). Всплывающие магнитные поля генерируют регистрируемые при наблюдениях мощные ударные волны непосредственно в солнечной атмосфере [Eselevich, Eselevich, 2003].

Заключение

В минимуме активности цикла сильные магнитные поля в атмосфере Солнца практически отсутствуют, но устойчивая однородная аномально прогретая корона есть всегда [Обридко, 1985]. Альтернативы механизму ее прогрева за счет диссипации энергии слабых ударных волн нет. Механизм генерации ударных волн, представленный в настоящей работе, имеет следующую особенность: сильные магнитные поля из нижних слоев конвективной зоны всплывают в режиме развития неустойчивости Паркера для младших (крупномасштабных) гармоник ($m \leq 6$). Критические глубины для старших гармоник ($m \geq 8$) располагаются ближе к фотосферному уровню. Крупномасштабные колебания естественно обеспечивают более однородный прогрев солнечной атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Еселевич В.Г., Еселевич М.В., Кучеров Н.В. и др. Генерация волнового потока на фотосферном уровне в эпоху минимума активности цикла // Труды Байкальской международной научной школы по фундаментальной физике. XII конференция молодых ученых. Иркутск, 2011. С. 103–105.
- Обридко В.Н. Солнечные пятна и комплексы активности. М.: Наука, 1985. 255 с.
- Прист Э.С. Солнечная магнитогазодинамика. М.: Мир, 1982. 608 с.
- Christensen-Dalsgaard J., Dappen W., Ajukov S.V., et al. The current state of Solar modeling // Science. 1996. V. 272. P. 1286.
- Eselevich V.G., Eselevich M.V. Common characteristics of CME and blobs a new view of their possible origin // Solar Phys. 2003. V. 165. P. 2001.
- Parker E.N. Stellar fibril magnetic system I. Reduced energy state // Astrophys. J. 1984. V. 283. P. 343–348.

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

²Красноярский государственный педагогический университет, Красноярск