

среднего $\langle b \rangle$ и W соответственно 0,53 и 0,80. Результаты обсуждаются в рамках сопоставления традиционных (Солнце) и альтернативных моделей вспышек на звездах. Циклические изменения параметров степенного спектра с фазой 11-летнего цикла (пульсации спектра) требуют пересмотра традиционных "магнитных" моделей вспышек с привлечением энергий внешнего воздействия – модель "солитонов" [2] или волн типа "цунами" (для мощных вспышек в случае Солнца) [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Гершберг Р. Е. Вспыхивающие красные карликовые звезды // Успехи физических наук. 1998. Т. 168, № 8. С. 891-898.
2. Гершберг Р. Е., Могилевский Э. И., Обридо В. Н. Энергетика активности вспыхивающих звезд: синергетический подход // Кинематика и физика небесных тел. 1987. Т.3, № 5. С. 3-17.
3. Kasinsky V.V., Sotnicova R.T. (1989). Solar and stellar flares U.A.I. Colloq. No.104, 15-19 Aug. 1988, Stanford Univ., California, USA: POSTER PAPERS, ed. B. M. Haisch and M. Rodono, Special publication. 1989. P. 255-258.
4. Касинский В. В., Сотникова Р. Т. Вариации энергетического спектра и временной шкалы рентгеновских вспышек в 11-летнем цикле солнечной активности (№21) // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. М.: Наука, 1989. , № 87. С. 43-55.
5. Курочка Л.Н. Распределение энергии 15 тысяч солнечных вспышек // Астрон. ж. 1987. Т. 64, № 2. С. 443-446.
6. Сомов Б. В. Магнитное пересоединение и энергетика солнечных вспышек // Год солнечного максимума. М: Наука, 1981. С.100-107.
7. Alekseev I. Yu. and Gershberg R. E. The activity of the red dwarf stars EV Lac // The Earth and Universe. Aristotel Univ. Thessaloniki. Ziti Ed.,1997. P. 43-57.
8. Gershberg R. E. Time scales and energy of flares on red-dwarf stars // XXII Congress. Soc. Astron. Italy. Catania, 4-7 may 1988. Prepr. N. 9. P. 3-16.
9. Kasinsky V.V., Krat V.V. On the solar tsunamy // Solar Physics. 1973. V. 31. P.219-228.
10. PRAF of Solar Geophysical Data, (1972 –2001). NOAA-USAF Space Envir. Center, Boulder, Colo., US Dep. Comm.

Г.И. Корниенко

К ВОПРОСУ О ДВИЖЕНИЯХ В ТОКОВЫХ ПЕТЛЯХ

В настоящее время имеются убедительные свидетельства того, что в волокнах активных областей Солнца текут электрические токи. Одним из аргументов в пользу существования таких токов является часто наблюдаемая скрученность волокон в активных областях, когда волокно состоит из нескольких перевитых между собой тонких волоконцев. Электрические токи волокон, вероятно, играют важную роль в энергетике солнечных вспышек. Было показано, что перед вспышкой скрученность связанного с ней волокна увеличивается (увеличивается ток), а после вспышки уменьшается (уменьшается ток) [3, 8]. Оценки величины токов в волокнах, как правило, делаются на основании измерений степени скручивания их и приводят к значениям полных токов в пределах от 10^{10} А до 3×10^{11} А. Перед вспышкой полные токи могут достигать величины 10^{12} А.

Согласно [5] разрыв токовой цепи приводит к диссипации магнитной энергии тока и при столь значительных токах диссипация может обеспечить энергетiku крупной вспышки. Эта "контурная" модель вспышки в последнее время успешно развивается В.В. Зайцевым и А.В. Степановым [1,2]. Они предполагают, что в результате желобковой неустойчивости протуберанца, лежащего над токовой петлей, слабоионизованная плазма протуберанца проникает в токовую петлю и резко (на 8–9 порядков величины) увеличивает электрическое сопротивление петли, что эквивалентно разрыву электрической цепи. Сами электрические токи возникают благодаря механизму динамо, когда в условиях низкой ионизации фотосферной плазмы гидродинамические движения приводят к разделению зарядов (ионы увлекаются нейтральными атомами) и возникновению электрического поля.

В плазме, состоящей из заряженных частиц и нейтральных атомов, под действием электрического поля заряженные частицы начи-

нают двигаться и за время между последовательными столкновениями с другими частицами приобретают некоторую направленную (дрейфовую) скорость. Величина дрейфовой скорости зависит от напряженности электрического поля, массы и плотности частиц, характера взаимодействия заряженной частицы с окружающими частицами плазмы. В токовых петлях солнечной атмосферы при хромосферных значениях температур 10^4 К плазма в основном состоит из протонов, электронов и нейтральных атомов водорода. При движении ионов (протонов) через собственный газ наиболее вероятным и эффективным процессом взаимодействия является перезарядка. При этом протон обменивается электроном с нейтральным атомом и сохраняет свою дрейфовую скорость, а новый протон начинает ускоряться электрическим полем до следующего акта перезарядки. Таким образом, ионы оказываются “привязанными” к нейтральным атомам и электрическое поле приводит в движение не только заряженные частицы, но, в конечном счете, и нейтральные атомы. Поэтому можно ожидать, что при некоторых условиях в токовых петлях солнечной атмосферы могут возникать макроскопические течения плазмы под действием электрических полей.

Рассмотрим бессиловую токовую петлю, в которой электрический ток течет вдоль силовых линий магнитного поля. Скорость электрического дрейфа протонов, движущихся в собственном газе, может быть представлена в следующем виде:

$$V_d = K \times E, \quad (1)$$

где K – подвижность иона, E – напряженность электрического поля. При малых напряженностях поля энергия, получаемая ионом между двумя последовательными столкновениями, много меньше его тепловой энергии и дрейфовая скорость иона много меньше его тепловой скорости. В сильных электрических полях дрейфовая скорость иона значительно превышает его тепловую скорость.

Сделаем оценки дрейфовых скоростей протонов в токовых петлях. Для этого примем следующие параметры петли с током [1,2]: площадь поперечного сечения петли $S = 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^2$, полный ток в петле $I = 10^{10} - 10^{11} \text{ А}$, электропроводность плазмы петли 10^{11} ед .

СГСЭ. Из закона Ома для цепи можно получить оценку напряженности электрического поля в петле $E = 10^{-2} - 10^{-5} \text{ В/см}$. Является такое поле сильным или слабым? Для ответа на этот вопрос необходимо вычислить дрейфовую скорость протона с учетом его взаимодействия с окружающими частицами и сравнить ее с тепловой скоростью. Дрейфовая скорость может быть найдена из соотношения (1). Зная подвижность протонов в собственном газе, получим зависимость дрейфовой скорости от напряженности электрического поля. Подвижность протона в собственном газе при больших напряженностях электрического поля можно представить в виде [4]

$$K = (2e)^{1/2} (\pi \sigma_{\text{рез}} m_p N E)^{-1/2}, \quad (2)$$

где e – заряд электрона, m_p – масса протона, N – число частиц в единице объема, $\sigma_{\text{рез}}$ – сечение резонансной перезарядки. В предположении слабой зависимости $\sigma_{\text{рез}}$ от относительной скорости сталкивающихся частиц для перезарядки протонов и атомов водорода может быть взято значение $\sigma_{\text{рез}} = 6,2 \times 10^{-15} \text{ см}^2$ [4]. Тогда

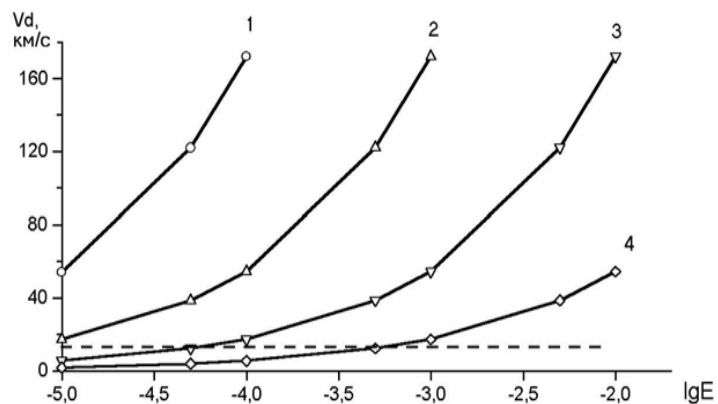
$$V_d = 1,72 \times 10^{14} (E/N)^{1/2} \text{ см/с}. \quad (3)$$

На рисунке приведены зависимости дрейфовой скорости протонов V_d как функции $\lg E$ для различных значений плотности частиц N : 1 – $N=10^{10}$, 2 – $N=10^{11}$, 3 – $N=10^{12}$, 4 – $N=10^{13} \text{ см}^{-3}$. Пунктиром показано значение наиболее вероятной тепловой скорости протонов при $T = 10^4 \text{ К}$ ($V_t = 12,9 \text{ км/с}$). Из рисунка видно, что лишь для высоких плотностей $N = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ поля напряженностью $E = 10^{-5} - 10^{-3} \text{ В/см}$ будут слабыми, и здесь дрейфовая скорость не превышает тепловой скорости протонов. При плотностях частиц меньших 10^{12} см^{-3} электрические поля напряженностью $E = 10^{-5} - 10^{-2} \text{ В/см}$ являются сильными и дрейфовая скорость значительно превышает тепловую скорость протонов.

Необходимо сделать несколько замечаний о качественной кар-

тине движений в токовых петлях. В низких петлях (и, вероятно, более плотных при плотности около 10^{13} см⁻³) дрейфовые скорости протонов в электрическом поле напряженностью $10^{-5} - 10^{-3}$ В/см не будут превышать их тепловых скоростей и поэтому такие поля не вызовут макроскопических течений в петлях. Течения более вероятны в петлях, расположенных достаточно высоко в атмосфере, плотности которых лежат в области $10^{10} - 10^{12}$ см⁻³. Течение в петле при этом будет одного знака (от одного основания петли к другому) в зависимости от знака электрического поля. Максимальные скорости течений наиболее вероятны в вершинах петель. Из-за влияния силы тяжести в симметричной петле скорости подъема на одной половине петли будут по величине меньшими, чем скорости опускания на другой половине. Вблизи оснований петель, где можно ожидать увеличения плотности, скорости, обусловленные дрейфом в электрическом поле, должны уменьшаться.

Рассмотрим применимость полученных результатов к конкретной ситуации в солнечной атмосфере. Лоухед и Брей [9,10] по высококачественным наблюдениям в линии H_α (фильтрограммы в центре и крыльях линии) на основе оригинальной методики восстановили



Зависимость дрейфовой скорости протонов V_d от логарифма напряженности электрического поля $\lg E$ для различных значений плотности в токовой петле: 1 – $N=10^{10}$; 2 – $N=10^{11}$; 3 – $N=10^{12}$; 4 – $N=10^{13}$ см⁻³

трехмерную геометрию петли, связанной со вспышкой 06.06.1980 г. и определили физические параметры в нескольких точках петли.

В работе [9] с учетом отклонений от локального термодинамического равновесия определены физические условия (температуры, электронные плотности, населенности первых трех уровней атома водорода и скорости течений вдоль петли) в восьми точках петли L–L₈. Основания петли отстоят друг от друга на расстоянии 80 000 км, вершина петли расположена на высоте около 45 000 км над уровнем фотосферы, крайние точки петли L₁ и L₈ лежат на высотах 4 000 и 10 000 км над фотосферой, толщина петли от точки к точке изменяется незначительно и лежит в пределах 1000–2000 км. Найденные электронные температуры в различных точках петли лежат в области 15 000–25 000 К. В таблице приведены данные о скоростях и плотностях в петле, согласно [10].

	L ₁	L ₂	L ₃	L ₅	L ₆	L ₇	L ₈
Высота над фотосферой, км	4 000	13 000	25 000	45 000	43 000	37 000	10 000
Расстояние от вершины петли в проекции на фотосферу, км	37 000	29 000	20 000	2 000	-13 000	-20 000	-41 000
Лучевая скорость, V, км/с	7,3	14,6	25,1	-8,5	-29,7	-35,7	-77,7
Осевая скорость, V ₀ , км/с	36,5	67,3	124,8	76,4	33,8	39,2	93,9
Плотность, N ч 10 ¹⁰ , см ⁻³	7,41	6,92	4,79	7,59	3,31	3,02	6,31

Знак “минус” лучевой скорости соответствует опусканию. Электронная плотность во всех измеренных точках петли изменяется в пределах $3 - 7,6 \times 10^{10}$ см⁻³. Обращаясь к рисунку, мы видим, что при плотности 5×10^{10} см⁻³ наблюдаемые скорости в петле соответствуют скоростям дрейфа протонов при напряженности электрического поля $E = 10^{-5} - 10^{-3}$ В/см. Максимальная осевая скорость

**ВАРИАЦИИ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА
В ПРИМОРЬЕ И 11-ЛЕТНИЙ ЦИКЛ
СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

ВВЕДЕНИЕ

Проблеме гелиотропосферных связей посвящено огромное количество исследований, результаты которых позволяют сделать вывод о том, что если солнечно-атмосферные связи существуют, то они характеризуются региональностью и нестабильностью во времени [1,3]. Региональное проявление солнечно-земных связей в колебаниях погоды и климата объясняется сложным характером циркуляции воздушных масс в земной атмосфере. Многочисленные исследования показали, что в некоторых регионах Земли наблюдается положительная корреляция между индексами солнечной активности и метеорологическими параметрами [4,9], в других – отрицательная [9,10], а в третьих вообще отсутствует [11]. Кроме того, отклик метеорологических параметров на изменение солнечной активности изменяется в зависимости от сезонов года [5,8] и по-разному проявляется в четных и нечетных 11-летних циклах солнечной активности [6,7].

Во второй половине семидесятых годов исследователи солнечно-тропосферных связей разделились на две группы. К первой относились те, кому удалось найти значимые корреляции между параметрами солнечной активности и характеристиками тропосферы, ко второй – те, кто таких корреляций не нашли. К последним принадлежало большинство метеорологов, поскольку при анализе длинных рядов метеорологических данных "в лоб" (т.е. путем сопоставления индексов солнечной активности и метеопараметров за каждый год) выявить отклик тропосферы на изменения солнечной активности не удавалось. Существенным прорывом в проблеме солнечно-атмос-

наблюдается вблизи вершины петли. Скорость опускания в левой половине петли больше скорости подъема в правой половине. Таким образом, характер течений плазмы в петле 06.06.1980 г. может быть описан в предположении, что эти течения обусловлены дрейфом протонов в электрическом поле.

Отметим, что оценки физических условий в петлях, наблюдаемых за лимбом [7,6], дают температуру, несколько меньшую 7000 – 20 000 К и большую плотность $1 \times 10^{11} - 6 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Если ограничиться областью напряженностей электрического поля в петлях $10^{-5} - 10^{-3} \text{ В/см}$, то скорости течений в таких петлях в зависимости от плотности лежат в пределах от 20 до 170 км/с. В наиболее плотных петлях при плотности около $5 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ скорость дрейфа протонов практически не превышает их тепловой скорости.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зайцев В.В., Степанов А.В.* К динамо-теории солнечных вспышек // Астрон. ж. 1991, Т.68, вып.2. С.384-393.
2. *Зайцев В.В., Степанов А.В.* Природа вспышечного энерговыделения на Солнце и диагностика плазмы солнечных вспышек // Изв. КрАО. 1994. Т.92. С.25-43.
3. *Молоденский М.М., Филиппов Б.П.* Магнитные поля активных областей на Солнце. М.: Наука, 1992, с.151.
4. *Смирнов Б.М.* Физика слабоионизованного газа. М.: Наука, 1972. 416 с.
5. *Alfen H., Carlqvist P.* Currents in the solar atmosphere and a theory of solar flares // Solar Phys. 1967. V.1. P.220-228.
6. *Hirayama T.* Ionized helium in prominences and in the chromosphere // Solar Phys. 1972. V.24. P.310-323.
7. *Jefferies J.T., Orrall F.Q.* On the interpretation of prominence spectra. III // The line and continuous spectrum of a loop prominence and limb flare. Ap.J. 1961. V.133. P.963-968.
8. *Kurokawa H., Hanaoka Y., Shibata K., Uchida Y.* Rotating eruption of an untwisting filament triggered by the 3B flare of 25 april 1984 // Solar Phys. 1987. V.108, N 2. P.251- 264.
9. *Loughhead R.E., Bray R.J.* High-resolution photography of the solar chromosphere. XIX. Flow velocities along an active region loops // Ap. J. 1984. V.283, N 1. P.392-397.
10. *Loughhead R.E., Bray R.J., Wang J.-L.* High-resolution photography of the solar chromosphere. XXI. Determination of the physical conditions in an H α active – region loop // Ap. J. 1985. V.294, N 2. P.697 – 701.