

от величин, характерных для спокойной фотосферы, до величин, характерных для развитой области. Иная картина для поля хвостовой полярности: на фоне аналогичной тенденции существуют значимые флуктуации рассматриваемых параметров. Это указывает на значительную фрагментарность выходящего магнитного поля хвостовой полярности.

В заключение перечислим основные результаты.

1. Обнаружено существование области усиленного подъёма вещества в фотосфере при прохождении через неё вершины петли магнитного потока, образующей активную область. Размер её достигает 30000 км. Максимальная скорость подъёма 2 км/с. Время жизни ~2 часа.

2. Подтверждена волнообразная форма трубок потока во всплывающей петле при пересечении ими фотосферы.

3. Методом структурного анализа показано наличие более высокой структурированности поля хвостовой полярности по сравнению с головной на стадии формирования активной области.

Полученные данные дополняют и развивают современную картину возникновения активных областей.

Авторы благодарны команде SOHO/MDI за возможность доступа к базам данных по сети Интернет. Работа выполнена при поддержке грантов господдержки ведущих научных школ РФ НШ-4741.2006.2, интеграционного проекта СО РАН и ДВО РАН и программы Президиума РАН “Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце-Земля”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абраменко В. МГД-турбулентность в областях на Солнце с различным уровнем вспыхивающей активности // Астрон. Журнал. 2002. Т. 79, № 2. С.182-192.
2. Strous L. H., Zwaan C. Phenomena in an emerging active region. II. Properties of the dynamic small-scale structure // The Astrophysical Journal. 1999. V. 527, № 1. P. 435-444.
3. Zwaan C. The emergence of magnetic flux // Solar Phys. 1985. V. 100, № 2. P. 397-414.

Д.В. Ерофеев

ГЕОМЕТРИЯ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ ММП В МЕРИДИОНАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ГЕЛИОСФЕРЫ

ВВЕДЕНИЕ

Меридиональная компонента межпланетного магнитного поля B_θ , как и другие компоненты ММП, содержит регулярную и флуктуационную составляющие. Однако регулярная составляющая B_θ в среднем мала по сравнению с флуктуационной, поэтому выводы о регулярной геометрии ММП в меридиональной плоскости можно сделать только на основе статистического анализа данных, охватывающих большой интервал времени. Хорошо известно, что измерения на околоземных орбитах показывают наличие слабой линейной корреляции между радиальной и меридиональной компонентами ММП, которая изменяется в течение года при изменении гелиографической широты Земли [1,2]. Этот сезонный ход корреляции можно объяснить небольшой сверхрадиальной расходимостью силовых линий ММП относительно гелиографического экватора.

Структура ММП определяется главным образом дипольной составляющей крупномасштабного магнитного поля Солнца (которая далее для краткости именуется «солнечным диполем»), причём из-за наклона диполя к оси вращения Солнца «гелиомагнитный» экватор не совпадает с гелиографическим. Можно ожидать, что силовые линии ММП обладают симметрией по отношению именно к «магнитному экватору» гелиосферы, который следует отождествить с поверхностью $B_r=0$, то есть с гелиосферным токовым слоем (ГТС) [7]. Действительно, по крайней мере в периоды, близкие к минимумам солнечного цикла, меридиональная компонента ММП имеет регулярную составляющую, которая симметрична относительно ГТС и изменяет направление в зависимости от ориентации солнечного диполя [3]. Поведение этой регулярной составляющей, очевидно, от

ражает геометрию силовых линий ММП в меридиональной плоскости гелиосферы.

ДААННЫЕ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе используются среднесуточные значения компонент вектора ММП, измеренные космическими аппаратами на околоземных орбитах в период с 1964 г. по 2005 г., и собранные в хорошо известной базе данных NSSDC OMNI. Мы будем использовать значения радиальной B_r и меридиональной B_θ компонент ММП, которые совпадают с точностью до знака с компонентами B_x и B_z магнитного поля в геоцентрической солнечно-экваториальной системе координат GSEQ: $B_r = -B_x$, $B_\theta = B_z$ (направление отсчёта θ выбрано с юга на север). Кроме этого, мы воспользовались данными о широтной протяженности гелиосферного токового слоя F_{CS} начиная с 1976 г., полученными на Солнечной обсерватории Вилкокка (<http://quake.stanford.edu/~wso>).

Из-за наклона ГТС к плоскости гелиографического экватора, Земля в течение одного солнечного оборота оказывается попеременно в разных магнитных полушариях гелиосферы, что проявляется в чередовании магнитных секторов с противоположным направлением радиального магнитного поля B_r . Как правило, наклон ГТС к солнечному экватору не превышает 45-50°, поэтому по направлениям радиальной компоненты ММП и проекции D_p дипольного магнитного момента Солнца на ось вращения можно с определенностью говорить о том, находится ли Земля в конкретный момент времени в северном магнитном полушарии (то есть севернее ГТС) или в южном. Исключение составляют периоды смены знака D_p вблизи максимумов активности, имеющие продолжительность в 2-3 года.

Поскольку напряженность радиальной компоненты ММП возрастает по модулю при удалении от токового слоя, существует приблизительное соответствие между «магнитной широтой» точки наблюдения, то есть расстоянием по широте от этой точки до ГТС, и измеренным значением B_r (разумеется, коэффициент пропорциональности между ними изменяется со временем). Поэтому зависи-

мость между меридиональной и радиальной компонентами ММП отражает пространственную структуру ММП в некоторой области широт вокруг ГТС. Имея достаточный объем данных, нетрудно найти эту зависимость, разбив интервал вариации B_r на небольшие ячейки и рассчитав средние значения B_θ в каждой из ячеек, а также их стандартные ошибки. При анализе полученной зависимости следует иметь в виду, что в случае систематического отклонения силовых линий ММП в ту или иную сторону от радиального направления будут иметь место определённые соотношения между знаками меридиональной компоненты ММП и проекции магнитного диполя Солнца на ось вращения. Эти соотношения приведены в таблице, причем D_p считается положительным, когда радиальная компонента ММП B_r положительна в южном полушарии Солнца.

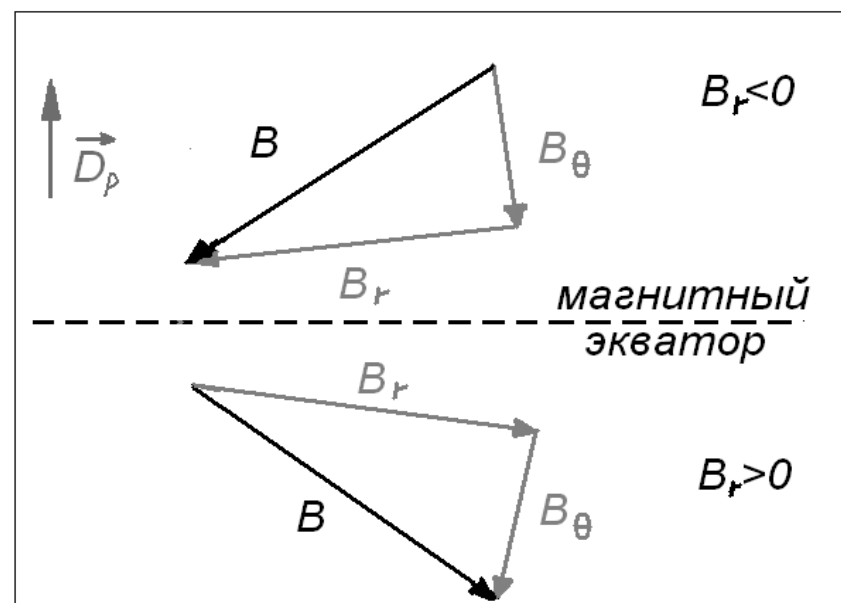


Рис.1. Схема, показывающая соотношение между компонентами ММП в меридиональной плоскости гелиосферы, для сверхрадиально расходящихся силовых линий ММП и при положительном знаке дипольного магнитного момента Солнца (север вверху)

Таблица

Направление силовых линий ММП	$D_p > 0$	$D_p < 0$
расходящееся	$B_\theta < 0$	$B_\theta > 0$
сходящееся	$B_\theta > 0$	$B_\theta < 0$
радиальное	$B_\theta = 0$	$B_\theta = 0$

В качестве примера на *рис. 1* схематически показан случай сверхрадиально расходящихся силовых линий ММП при $D_p > 0$.

ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ КОМПОНЕНТАМИ ММП B_θ И B_r ПРИ РАЗНОЙ ОРИЕНТАЦИИ СОЛНЕЧНОГО ДИПОЛЯ

Из таблицы и *рис. 1* следует, что при неизменной геометрии ММП его меридиональная компонента B_θ должна быть четной функцией радиальной компоненты B_r и изменять знак каждые 11 лет при смене направления магнитного диполя Солнца. Эти выводы подтверждаются данными корреляционного анализа, проделанного в работе [3]. Однако корреляционный анализ компонент ММП сам по себе недостаточен для однозначных выводов относительно геометрии силовых линий магнитного поля. Поэтому рассмотрим зависимость между B_θ и B_r подробнее.

Полученная описанным выше способом зависимость между меридиональной и радиальной компонентами ММП показана на *рис. 2*, отдельно для периодов времени, когда солнечный диполь был ориентирован на север и на юг. Как можно видеть, в обоих случаях исследуемая зависимость представляет собой приблизительно четную функцию B_r и демонстрирует «обращение» при изменении знака проекции солнечного диполя D_p . При больших по модулю значениях B_r (т.е. на достаточно большом удалении от ГТС) знаки B_θ и D_p противоположны, что соответствует сверхрадиальному расхождению силовых линий (см. табл.1). Это согласуется с результатами [1,2]. По данным *рис.2* можно оценить угол сверхрадиального расхождения ММП на больших расстояниях от ГТС: так как отношение $|B_\theta/B_r|$ возрастает с ростом $|B_r|$ до значений $\approx 0,05$, можно заключить, что этот угол достигает 2–3 градусов.

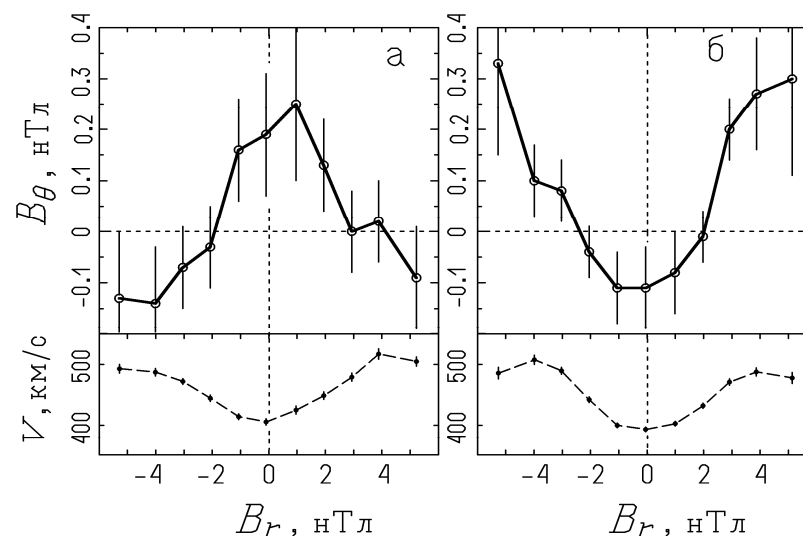


Рис.2. Зависимость между меридиональной B_θ и радиальной B_r компонентами ММП, для положительного (а) и отрицательного (б) знаков проекции дипольного магнитного момента на ось вращения Солнца. Штриховой линией внизу показаны зависимости между скоростью солнечного ветра V и B_r .

Однако в некоторой области вблизи ГТС меридиональная компонента ММП B_θ имеет направление, совпадающее с направлением D_p , причем она определенно не обращается в нуль при $B_r=0$. Это означает, что вблизи ГТС силовые линии ММП являются в среднем сходящимися, и по крайней мере часть из них замыкается в петли, основания которых направлены к Солнцу. Граница области со сходящимися силовыми линиями соответствует значению радиального магнитного поля $B_r \approx 2,5$ нТл (геометрический размер этой области мы оценим ниже).

ГЕОМЕТРИЯ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ ММП И ЕЕ ВАРИАЦИИ В СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ

Таким образом, геометрия силовых линий в меридиональной плоскости Солнца представляется такой, как схематически показано

на *рис.3*: ближайшие окрестности ГТС занимает широтная зона, содержащая замкнутые петли магнитного поля, тогда как на некотором расстоянии к северу и к югу от токового слоя расположены зоны со сверхрадиально расходящимися силовыми линиями ММП. Геометрический размер зоны широт с петлями магнитного поля существенно изменяется со временем (см. ниже).

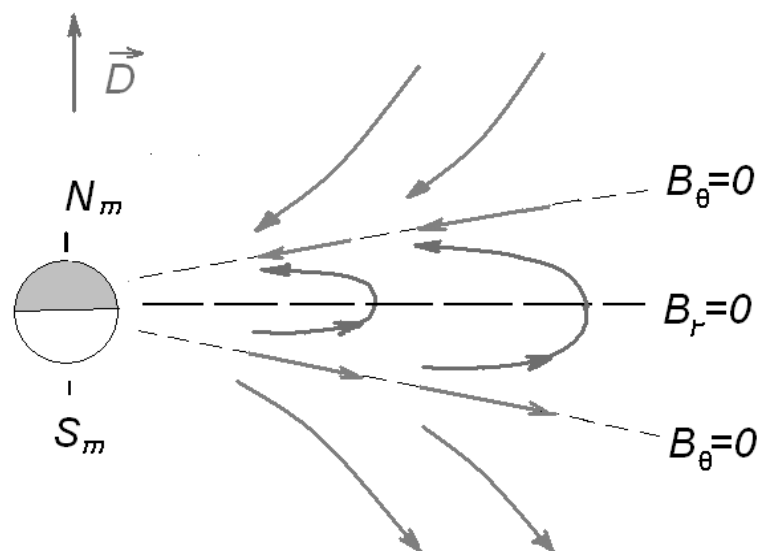


Рис.3. Геометрия силовых линий ММП в меридиональной плоскости гелиосферы (схема). В левой части рисунка показано распределение дипольного магнитного поля в основании гелиосферы, N_m и S_m – северный и южный магнитные полюса Солнца; линия $B_r=0$ – гелиосферный токовый слой. Силовые линии ММП показаны сплошными линиями со стрелками

Интересно получить хотя бы приблизительное представление о том, как описанная выше геометрия силовых линий ММП изменяется в ходе солнечного цикла. Рассчитать зависимость между B_θ и B_r для коротких интервалов времени порядка года не представляется возможным ввиду большого случайного разброса значений B_θ , по-

этому мы применили сокращённое описание этой зависимости в виде полиномиальной аппроксимации:

$$B_\theta = b_0 + b_1 \frac{B_r}{\langle |B_r| \rangle} + b_2 \frac{B_r^2}{\langle B_r^2 \rangle}, \quad (1)$$

где угловые скобки означают усреднение за весь 42-летний интервал времени. Выбор квадратичной функции сделан в соответствии с поведением исследуемой зависимости в окрестности ГТС, где она имеет приблизительно параболическую форму (*рис. 2*). Нормировка на средние значения введена для того, чтобы коэффициенты b_k имели одинаковую размерность, а их величины были приблизительно пропорциональны вкладам соответствующих членов полинома (1). Значения коэффициентов b_k рассчитаны методом наименьших квадратов для скользящего 2-хлетнего интервала времени, для значений радиального поля $|B_r| < 4$ нТл. Результат показан на *рис. 4*.

Как можно видеть на *рис. 4*, коэффициенты b_0 и b_2 , описывающие четную составляющую зависимости между B_θ и B_r , показывают хорошо выраженную 22-хлетнюю вариацию, происходящую приблизительно в соответствии с изменением знака проекции дипольного магнитного момента на ось вращения Солнца. При этом b_0 и b_2 изменяются противофазно друг другу. Такое их поведение говорит о том, что структура ММП, показанная на *рис.3*, сохраняется в течение большей части исследуемого интервала времени, хотя геометрические размеры зон с расходящимися и сходящимися силовыми линиями изменяются (см. ниже). Заметное исключение составляет период длиной в несколько лет близи минимума 20 цикла (1976 г.), когда b_0 был практически равен нулю, то есть зона с петлями магнитного поля вблизи ГТС в это время отсутствовала, и силовые линии ММП были просто сверхрадиально расходящимися. Вблизи минимума 1986 г., наоборот, коэффициент b_0 имел относительно большие значения, соответственно зона широт с петлями ММП была очень хорошо выраженной. Таким образом, имеет место не только циклическая, но и аперриодическая вариация структуры ММП.

Коэффициент b_1 не показывает 22-хлетней периодичности, а только сравнительно кратковременные вариации с временным масштабом 4–6 лет. Этот коэффициент в среднем относительно мал, что

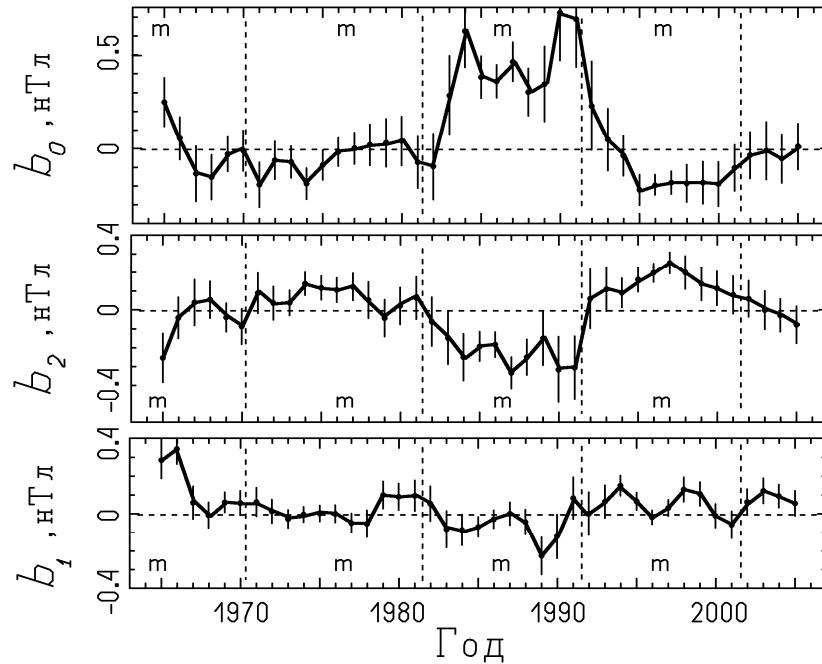


Рис.4. Коэффициенты b_k , описывающие зависимость между меридиональной B_θ и радиальной B_r компонентами ММП, в функции времени. Знаком m помечены минимумы солнечной активности, вертикальными пунктирными линиями – эпохи смены ориентации магнитного диполя Солнца

означает отсутствие значительной асимметрии меридиональной компоненты ММП относительно магнитного экватора Солнца. Заметная асимметрия, однако, появляется иногда на сравнительно короткое время; такое исключение из правила имело место, в частности, в минимуме активности 1965–66 гг.

Оценим геометрический размер области, содержащей сходящиеся силовые линии и петли ММП, учитывая что он изменяется со временем. Очевидно что амплитуда вариации магнитной широты Земли в течение одного оборота Солнца приблизительно равна широтной протяженности ГТС, F_{CS} , которая известна по расчетам на обсерватории Вилкокса. Определив амплитуду ΔB_r вариации ради-

альной компоненты ММП в течение того же оборота, можно найти масштабный множитель ξ , связывающий значения магнитной широты и напряженности радиального магнитного поля,

$$\xi \approx F_{CS} / \Delta B_r \quad (2)$$

На практике мы использовали средние за год значения F_{CS} и ΔB_r . Ширина L зоны, содержащей сходящиеся силовые линии ММП, оценивалась по формуле:

$$L = 2\xi B_0, \quad (3)$$

где $B_0 = 2,5$ нТл – значение $|B_r|$, соответствующее границам этой зоны. Результат расчета показывает, что в периоды минимумов активности, когда наклон ГТС мал, сравнительно мало также и значение $L \approx 10^\circ$, а на ветвях спада и роста солнечных циклов L может достигать значений в $30\text{--}40^\circ$ (конечно, эти оценки приблизительные). Подчеркнем, что L – это размер зоны широт с центром на ГТС, а не на гелиографическом экваторе, поэтому Земля проводит в этой зоне сравнительно небольшую часть времени, когда она находится вблизи секторных границ ММП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Зависимость между меридиональной B_θ и радиальной B_r компонентами ММП указывает на то, что существуют две области широт с разной геометрией силовых линий: на достаточно большом удалении от ГТС силовые линии ММП являются в среднем сверхрадиально расходящимися, однако вблизи токового слоя они сходятся и, по крайней мере отчасти, замкнуты в петли. Такая структура ММП сохраняется в течение большей части исследованного интервала времени (42 года), исключая сравнительно короткие периоды смены ориентации магнитного диполя Солнца относительно направления север–юг, а также «аномальный» период вблизи минимума 20 цикла активности. Размер зоны широт с петлями магнитного поля изменяется приблизительно от 10° в минимумах солнечных циклов до $30\text{--}50^\circ$ в периоды высокой активности.

О присутствии магнитных петель, вытянутых в межпланетное пространство из низкоширотной области солнечной короны, свидетельствуют данные [4], хотя в работе [5] теоретически обосновывается образование петель в результате магнитного пересоединения в токовом слое. Авторы [3] объясняют нерадиальность силовых линий ММП падением радиальной скорости солнечного ветра в окрестности токового слоя. Однако пониженная скорость ветра вряд ли может объяснить присутствие петель магнитного поля; скорее можно предположить обратное – влияние замкнутой конфигурации магнитного поля на скорость СВ. В работе [6] обнаружено меридиональное течение солнечного ветра со скоростью около 3 км/с, направленное на север и на юг от ГТС. Вероятно, это течение связано с замкнутой геометрией ММП вблизи токового слоя и представляет собой поток плазмы, направленный вдоль силовых линий от вершин петель магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке Государственного контракта № 10104-34/П-16/041-400/140606-028 и Интеграционного проекта СО РАН – ДВО РАН № 183.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обридо В.Н., Гольшев С.А., Левитин А. Е. Связь структуры крупномасштабного магнитного поля Солнца в циклах солнечной активности со структурой ММП, оказывающей влияние на геомагнитную активность // Геомагнетизм и аэрономия, 2004, т. 44, с. 449–452
2. Понявин Д.И., Усманов А.В. Годовые вариации соотношения B_x - и B_z -компонент ММП в GSEQ-, GSE-, и GSM-системах координат // Геомагнетизм и аэрономия, 1985, т.25, с. 128–129
3. Lyatsky W., Tan A., Lyatskaya S. Effect of the Sun's magnetic field polarity on interplanetary magnetic field B_z // Geophys. Res. Lett., 2003, v. 30, p. 2258–2261
4. Pudovkin M.I., Ponjavin D.I., Chertkov A.D. Recurrency and the origin of the vertical component of the interplanetary magnetic field // Solar Phys., 1980, v. 66, p.411–416
5. Pudovkin M.I., Runova A.V., Zaitseva S.A., Besser B.P., Meiser C.-V. Electric currents at IMF sector boundaries // Solar Phys., 1999, v. 184, p. 173–186
6. Richardson J.D., Paularena K.I. Meridional flow in the solar wind // J. Geophys. Res., 1996, v. 101, p. 19995–20002
7. Smith E.J. The heliospheric current sheet // J. Geophys. Res., 2001, v. 106, p. 15819–15831

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ХРОМОСФЕРНЫХ ВСПЫШЕК В АКТИВНЫХ КОМПЛЕКСАХ И ПРОБЛЕМА ВНЕШНЕГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ ВО ВСПЫШКАХ

Имеется ряд работ, прямо или косвенно указывающих на связь вспышечных явлений с волновыми процессами в хромосфере. Квазипериодические колебания наклона спектра радиоизлучения перед сильными вспышками с периодами 30–60 мин наблюдались в НИРФИ [6]. Для вспышечно-активных областей характерно существование осцилляций рентгеновского излучения с периодами 5–11 ч. На возможность связи звукового поля скоростей с триггером вспышки указывалось в работе [3]. В работе [1] была обнаружена модуляция 5 – минутных колебаний периодами 20, 30, 40 и 60 минут, причиной которых являются крупномасштабные периодические движения над фотосферой, отражающие присутствие g – мод хромосферы. Прямая попытка выявить низкочастотные колебания в параметрах вспышек в диапазоне 3–100 мин была предпринята в работе [7]. Анализ 50-ти активных областей показал, что в параметрах вспышек (длительность, площади) усилены периодические компоненты в области 20–30 минут, в согласии с [6].

О возможности прямых наблюдений g – мод колебаний хромосферы указывалось в работе [8], где выделены колебания с периодами 20–40 минут и длиной волны $\lambda \sim 30000$ км. В работе [5] было показано, что нижняя хромосфера и внутренняя корона являются неустойчивыми в отношении внутренних гравитационных колебаний. Волны с периодами 30 мин и более можно рассматривать как чисто гравитационные колебания хромосферы. Мы будем принимать следующий «сценарий» вспышечного процесса. Гравитацион-

* Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, 664074, Чернышевского 15