

# Одеяло для Солнца

О.Г. Верин

*События, происходящие на Солнце, не только определяют климат Земли и процессы планетарного масштаба, но и непосредственно влияют на самочувствие и здоровье каждого из нас.*

*Поэтому изучению Солнца придается такое большое значение, а каждый «сбой» солнечной активности и грандиозные магнитные бури, угрожающие работе электросетей, современной техники и интернета, приковывают к себе всеобщее внимание.*

*Однако «устройство» и функционирование Солнца настолько сложны, что количество неясностей и вопросов по мере изучения Солнца, пожалуй, растет быстрее, чем количество получаемых ответов.*

*И это несмотря на применение современных космических приборов и постоянное совершенствование методов исследования!*

*Становится все более очевидным, что в сложившейся физической картине Солнца не хватает какого-то ключевого элемента, который связал бы между собой кажущиеся разрозненными факты.*

## The Blanket for the Sun

O.G. Verin

### **Abstract**

*The events occurring on the Sun not only determine the Earth climate and processes of planetary scale, but also immediately influence on wellbeing and health of each of us.*

*Therefore such large value is attached to research of the Sun, and every «malfunction» of solar activity and enormous magnetic storms, threatening the operation of electrical supply networks, modern electric equipment and Internet, attract general attention.*

*However «interior arrangement» and operation mechanism of the Sun are so complex, that the amount of ambiguities and questions while studying the Sun, perhaps, grows faster, than the amount of discovered solutions.*

*And it occurs despite of use of modern space devices and constant progress in research techniques!*

*It becomes more and more evident, that in the existing physical picture of the Sun misses some key element, which would bind seeming separate facts.*

## **1. Введение**

Выражаясь техническими терминами, термоядерный реактор, которым фактически является Солнце, обладает удивительной стабильностью и надежностью работы. Солнечная постоянная ( $1373 \text{ Вт/м}^2$ ) – полная мощность излучения, которое падает на площадку единичной площади, помещенную вне атмосферы Земли на среднем расстоянии Земли от Солнца, действительно демонстрирует завидное постоянство и колеблется в пределах одного ватта [1].

Однако образ «идеального» Солнца за столетия его наблюдения становился в глазах ученых все более загадочным, пополняясь странными «детальями» и фактами.

В частности, оказалось, что на Солнце есть темные пятна, а их количество циклически изменяется со средней периодичностью в 11 лет.

Но излучение Солнца, как это ни покажется странным, увеличивается при максимальном количестве пятен.

Кроме того, цикл солнечной активности довольно сильно варьируется. Например, в XX веке он был ближе к 10 годам, а за последние 300 лет изменялся в широких пределах от 7 до 17 лет.

Выяснилось также, что Солнце имеет собственное магнитное поле довольно сложной конфигурации. В масштабах всего Солнца оно включает в себя дипольную составляющую и тороидальные поля, имеющие противоположные направления в северном и южном полушариях.

Существуют еще и локальные намного более мощные поля в местах темных пятен и неоднородностей - турбулентностей и выбросов плазмы.

Наиболее поразительным представляется тот факт, что магнитное поле Солнца периодически меняет свое направление на противоположное. Это происходит также примерно каждые 11 лет.

На этом «странности» нашего светила не заканчиваются. Например, среди труднообъяснимых особенностей Солнца называют огромную разницу температур между относительно холодной поверхностью Солнца (~ 5800K) и чрезвычайно горячей короной, разогретой до миллионов градусов.

В данной работе сделана попытка поиска ключевых элементов в физической картине Солнца, которые позволили бы объединить кажущиеся такими противоречивыми факты в логичную последовательность.

Естественно, что ввиду сложности проблемы предлагаемая трактовка физики Солнца не претендует на неоспоримость и рассматривается автором как одна из возможных гипотез.

## **2. Глобальная конвекция на Солнце**

В настоящее время вполне справедливо принято считать, что вариации солнечной активности в решающей степени зависят от процессов, происходящих в приповерхностных областях Солнца.

Что же касается внутреннего объема Солнца, то его непосредственное исследование очень затруднено, хотя происходящие там процессы теоретически разработаны достаточно подробно.

Ориентировочно до  $\frac{1}{4}$  радиуса Солнца занимает ядро (рис. 1), где протекают термоядерные реакции, а вплоть до 0,86 радиуса располагается промежуточная область, где происходит диффузия излучения [1, 2].

Эти две внутренние области вращаются практически как твердое тело.

Когда же речь заходит о конвективной области, которая простирается почти до самой поверхности Солнца, то ее описание до сих пор вызывает много вопросов.

Почему так важно для понимания закономерностей солнечной активности изучение процессов, происходящих в конвективной области?

Дело в том, что именно эти процессы являются задающими, так как их энергия фактически равна всей тепловой энергии, выделяемой Солнцем.

Именно с конвекцией связано наблюдаемое дифференциальное вращение солнечной поверхности. На экваторе период вращения равен приблизительно 25 суткам, у полюсов – порядка 36, а в среднем – 27 суток.

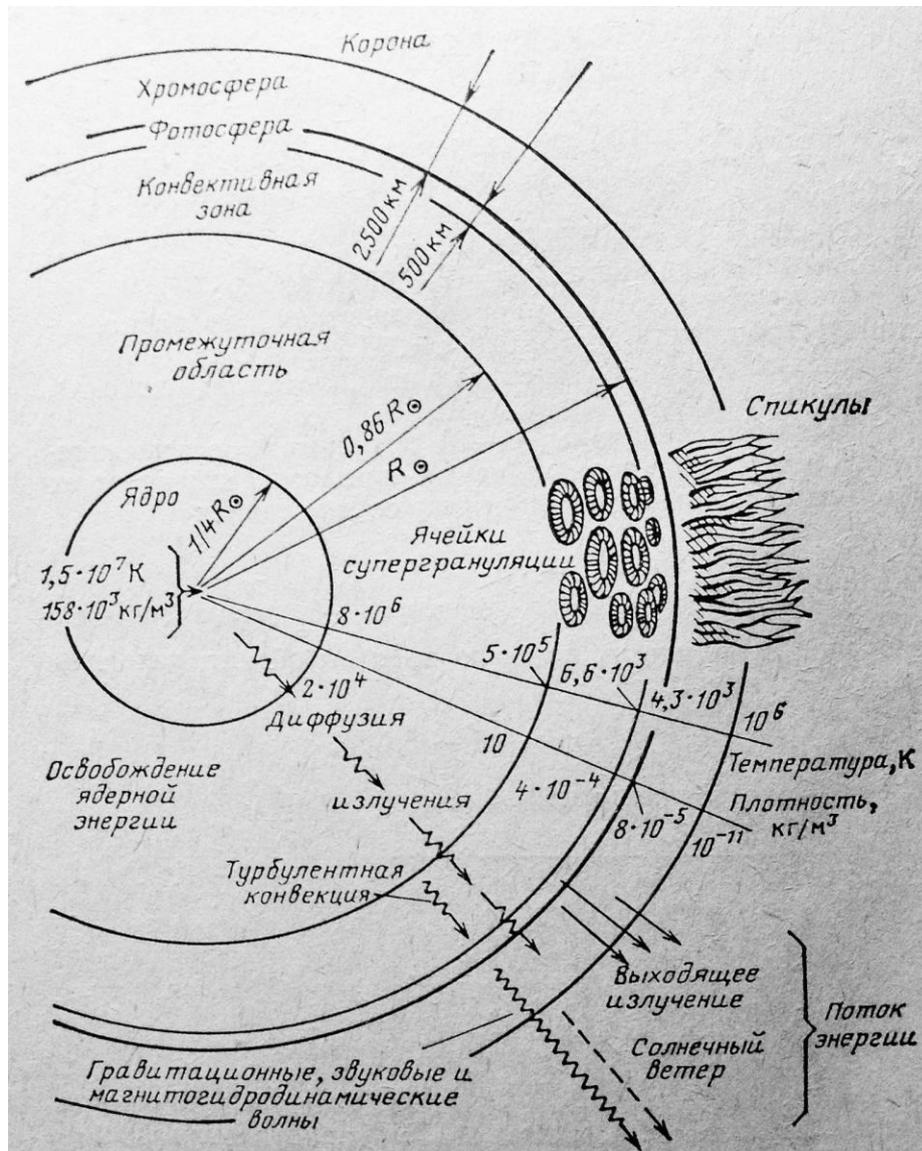


Рис. 1. Строение Солнца [1, 2].

При описании конвекции на Солнце логично учесть опыт исследования аналогичных процессов в атмосферах планет [3].

В частности, вращение Солнца должно приводить к тому, что конвективные ячейки, аналогично тому как это происходит, например, в

атмосфере Земли или Юпитера, должны «вытягиваться» вдоль направления вращения и располагаться симметрично относительно экватора (рис. 2, 3).

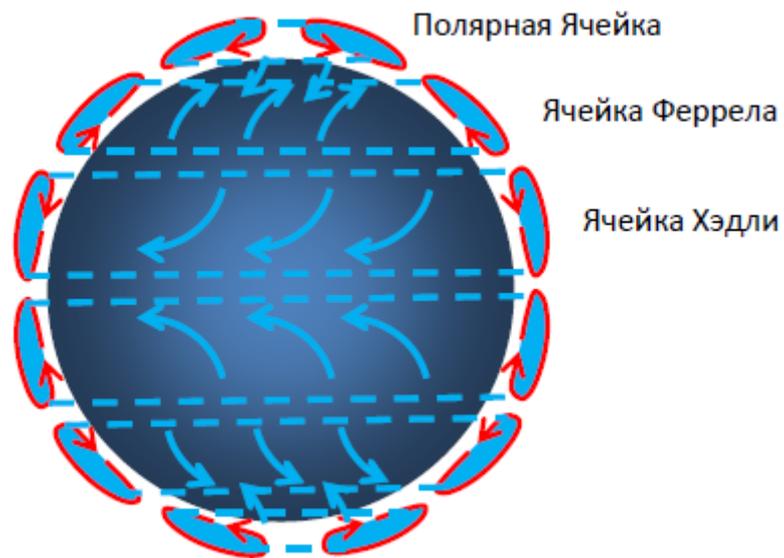


Рис. 2. Глобальные конвективные ячейки земной атмосферы.



Рис. 3. Перепады скоростей в местах контакта конвективных ячеек Юпитера приводят к возникновению вихрей.

Количество конвективных ячеек в атмосфере планеты существенно зависит как от размеров самой атмосферы, так и от особенностей энергетических потоков.

На Солнце количество глобальных конвективных ячеек можно определить по ряду косвенных признаков.

В первую очередь, необходимо попытаться связать особенности дифференциального вращения поверхности с конвективным движением.

Следует учитывать, что движение каждого элементарного объема плазмы при вращении происходит с соблюдением закона сохранения момента импульса. Поэтому удаление от оси вращения приводит к замедлению движения, а приближение к оси вращения – к ускорению.

Исходя из этого, можно предположить, что на Солнце в каждом полушарии имеются по две конвективных ячейки, как это показано на рис. 4.

*Полярные ячейки* включают в себя оба полюса, а *экваториальные ячейки* располагаются симметрично вдоль экватора.

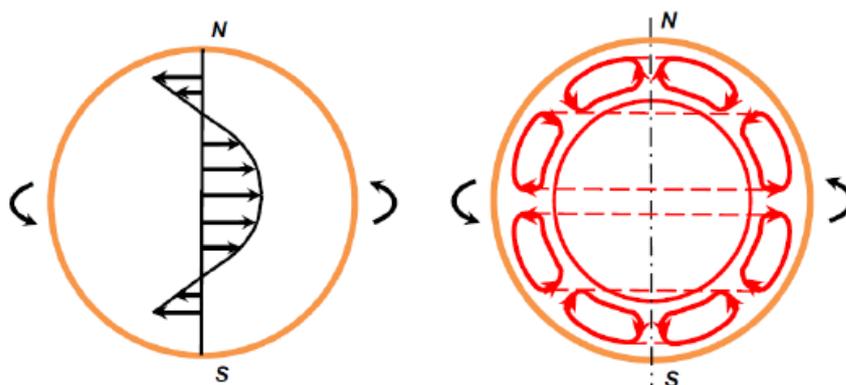


Рис. 4. Конвективные ячейки на Солнце (справа) и дифференциальное вращение (сдвиг относительно среднего перемещения за один оборот).

В качестве второго косвенного признака, который говорит в пользу изображенной на рис. 4 схемы конвекции на Солнце, можно рассматривать опоясывающую цепь возмущений на поверхности в средних широтах, где разливается разогретая плазма, поднимающаяся из глубины конвективной зоны в области экватора (рис. 5).

Легко заметить, что конвективное охлаждение у полюсов происходит более интенсивно, чем в области экватора. Действительно, к полюсам и от полюсов потоки направляются со всех сторон, в то время как в экваториальной области потоки идут лишь с двух сторон - с юга и с севера.

Как следствие, у полюсов поверхность Солнца более спокойная и не перегревается, а экваториальные ячейки периодически «закипают» [4].

Кроме того, полюса дополнительно охлаждаются из-за вертикального направления магнитного поля в этих областях, что способствует свободной эмиссии солнечного ветра с полюсов.

Экваториальные ячейки энергетически оказываются более мощными, и раскаленные массы плазмы, поднимающиеся из глубины вдоль экватора, растекаются по поверхности, достигая полярных ячеек.

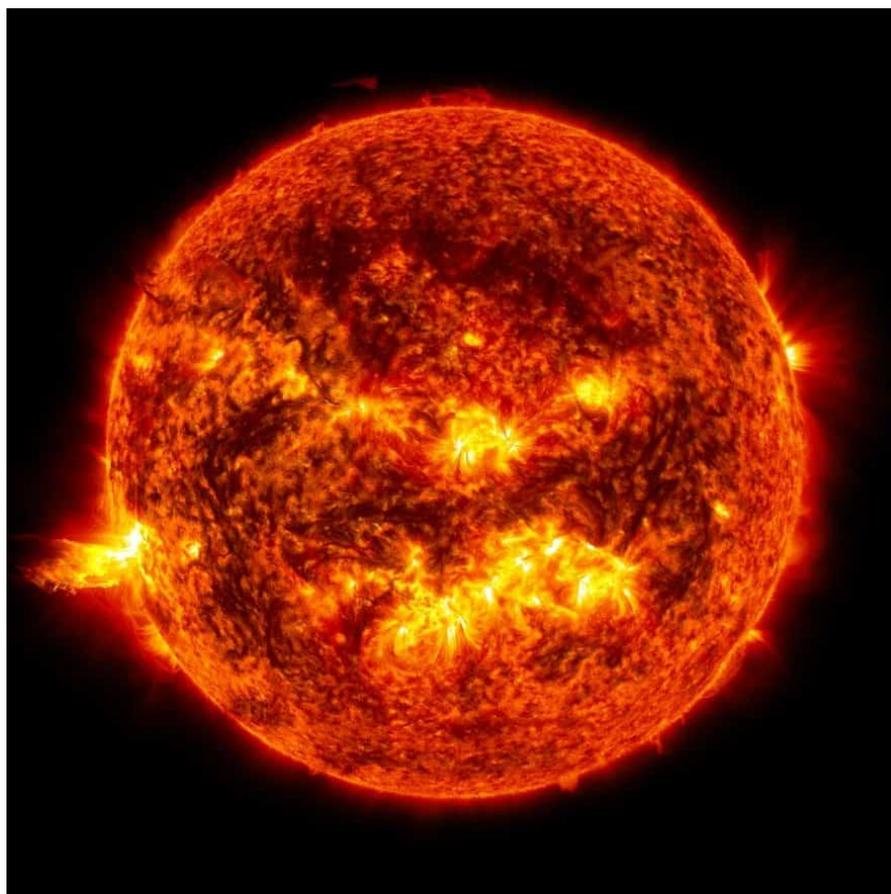


Рис. 5. С двух сторон от экватора вплоть до средних широт наблюдаются цепочки вспышек и турбулентностей [4].

В средних широтах постепенно охлаждающиеся массы плазмы опускаются в глубину. На фоне вращательного движения Солнца это способствует образованию вихрей, которые на больших широтах все больше становятся похожими на «перевернутые» циклоны в земной атмосфере [3].

О симметрии процесса конвекции относительно экватора свидетельствует диаграмма «бабочки» Маундера (рис. 6). Видно, что в начале цикла солнечной активности темные пятна появляются в районе широт  $\pm 30^\circ$ , а далее по мере «закипания» плазмы приближаются к экватору.

Эти процессы циклического охлаждения и «закипания» плазмы вызывают то замедление, то ускорение конвективного движения в целом.

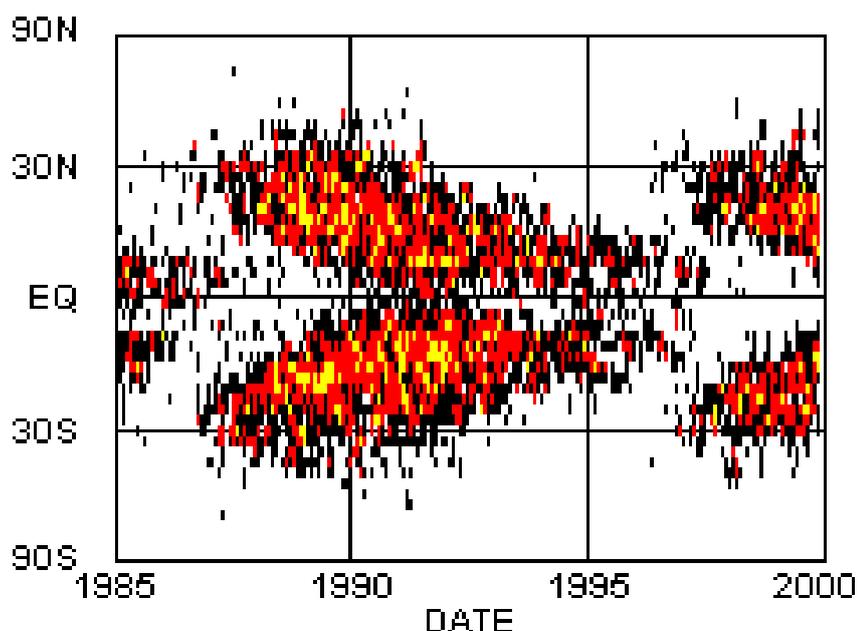


Рис. 6. Диаграмма «бабочки» Маундера [4].

Заметим также, что азимутальное вращение плазмы в конвективных ячейках в местах контакта с промежуточной областью Солнца должно соответствовать усредненной скорости вращения на этих широтах.

Следовательно, в зоне так называемого тахоклина (область контакта нижних слоев конвективных ячеек с зоной диффузии излучения) плазма проходит участки, на которых она испытывает то ускорение, то торможение.

На поверхности Солнца перепады скоростей плазмы в значительной степени сглаживаются покрывающим Солнце довольно плотным «одеялом», похожим на облака, природа которых будет рассмотрена подробно в п. 4.

Вся видимая поверхность Солнца как раз и представляет собой подобие «одеяла», состоящего из водорода в особом энергетическом состоянии, похожем на «вещество» шаровой молнии.

Это состояние проявляется в грануляции и огромном количестве постоянно происходящих очень мелких вспышек на поверхности Солнца.

Однако самый существенный эффект, создаваемый «одеялом», состоит в том, что оно действительно является тепловым экраном, сохраняющим и поддерживающим стабильность температуры Солнца.

Как это происходит?

При перегреве бурлящая плазма увеличивает количество разрывов в «одеяле». Возрастает количество темных пятен (вихрей), вспышек, трещин. Поэтому повышенная солнечная активность приводит к остыванию плазмы.

В результате, на следующем этапе активность Солнца снижается, а разрывы в «одеяле» затягиваются. В течение этой относительно спокойной фазы конвективная область под «одеялом» снова постепенно разогревается, и далее процесс повторяется.

Именно в этом состоит основная физическая причина наблюдаемой цикличности солнечной активности.

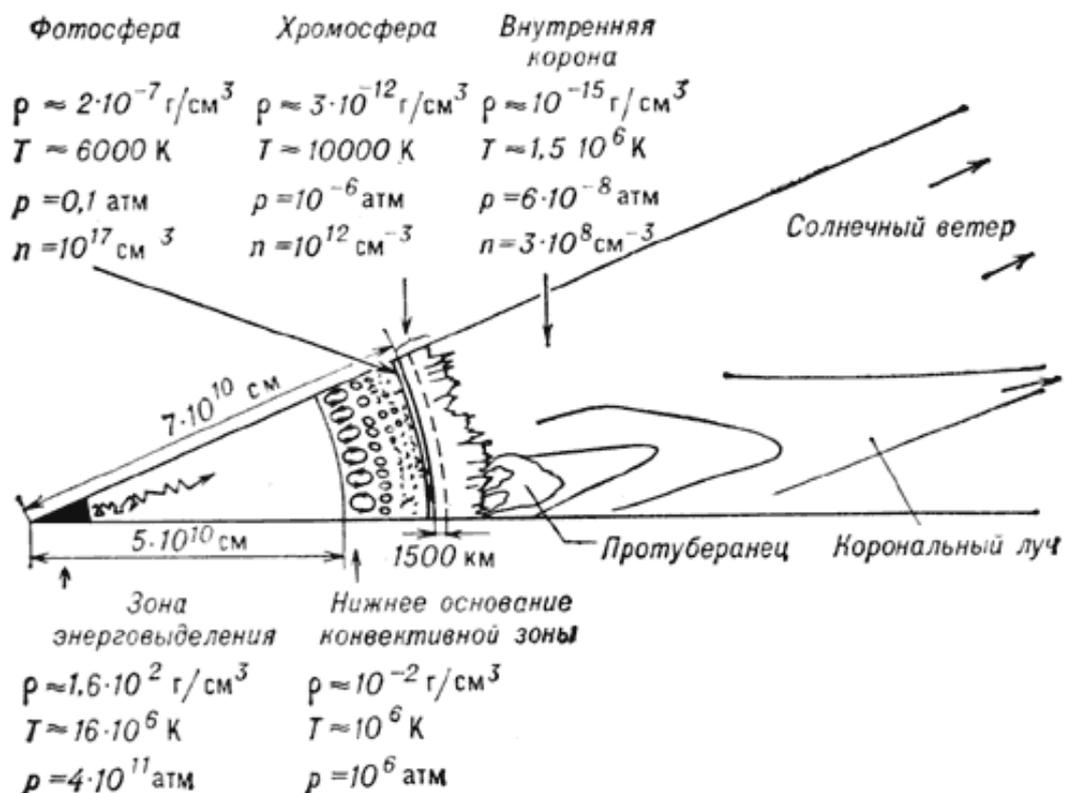


Рис. 7. Физические характеристики различных областей Солнца [2, 4].

Эффект теплового экрана заметен не только визуально по тому, как сквозь разрывы в этом «одеяле» изнутри прорывается мощное излучение. Объективным показателем является скачок основных характеристик плазмы и разительный контраст процессов, происходящих по обе стороны от теплового экрана, совпадающего с областью фотосферы (рис. 7).

Количество разрывов «одеяла» как в северном полушарии, так и в южном полушарии зависит от фазы солнечной активности, но вместе с тем могут иметь место и случайные отклонения.

Это происходит из-за того, что движение перегретой плазмы при конвекции не является ламинарным и образует всплески и завихрения, которые характерны для «непредсказуемого» турбулентного движения.

Поэтому в северном и южном полушариях интенсивность солнечной активности может различаться и иметь относительный сдвиг по времени.

Таким образом, взаимодействие северного и южного полушарий Солнца между собой приобретает сложный неравновесный характер.

Следует также учитывать, что на поверхности скорость конвективного движения составляет порядка 1 – 2 км/с, в то время как в глубинных областях она на порядки снижается из-за увеличения плотности. Поэтому плазма проходит путь по поверхности Солнца в течение недель, а замыкает цикл, двигаясь в глубине, за месяцы и даже годы.

Соответственно время «оборота» плазмы в разных слоях одной и той же конвективной ячейки может сильно различаться, вызывая существенные отклонения от усредненной цикличности солнечной активности и порождая вариации ее интенсивности (рис. 8).

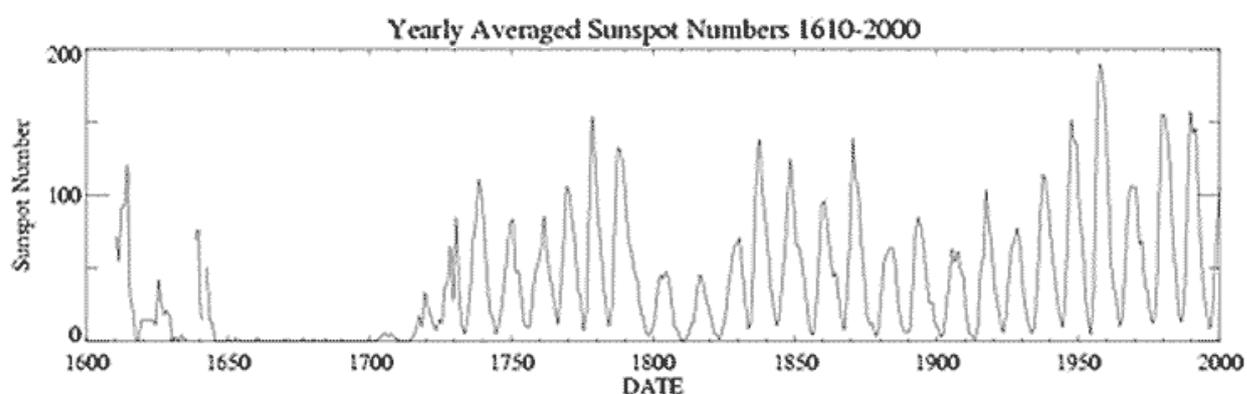


Рис. 8. Изменения солнечной активности за все время наблюдения (<http://crydee.sai.msu.ru/>).

В заключение этого раздела заметим, что, для дальнейшего анализа ключевое значение имеет вывод о воздействии цикличности солнечной активности на вариации скорости конвективного движения плазмы.

Это обстоятельство, как будет показано в следующем разделе, лежит в основе глобальных магнитных явлений на Солнце.

### **3. Структура общего магнитного поля Солнца и циклические изменения его полярности**

Сформулируем свойства плазмы, которые необходимо учитывать при анализе магнитного поля Солнца.

- Относительное движение электронов и ионов плазмы создает магнитное поле. Но так как плазма в целом вращается, то и магнитное поле вращается вместе с Солнцем.

- Газ электронов и газ ионов, находясь в относительном движении, «пронизывают друг друга» практически без «трения». Поэтому процесс естественного затухания магнитного поля оказывается очень длительным и в масштабах Солнца может занимать многие десятилетия.

Взаимное влияние движущейся плазмы и создаваемого этим движением магнитного поля с трудом поддается математическому описанию, однако анализ общего магнитного поля Солнца упрощается, так как в целом его структура следует за мощным конвективным движением, которое в данном случае играет роль задающего процесса.

Действительно, энергия конвективного движения определяется фактически всей энергией излучения Солнца. Поэтому конвекция является определяющим процессом по отношению к относительно слабому общему магнитному полю Солнца.

Кроме того, учитывая «спокойный характер» и в целом равномерное конвективное движение в полярных ячейках, будем считать, что эти ячейки практически не влияют на формирование магнитного поля Солнца.

Поэтому сосредоточимся на процессах в экваториальных ячейках.

Представим себе гипотетическое исходное состояние, при котором в экваториальных конвективных ячейках происходит равномерное движение плазмы, а магнитное поле отсутствует.

Если на плазму в таком начальном состоянии воздействует некоторый дополнительный градиент температур, ускоряющий конвекцию и приводящий к изменению скорости ионного газа, то электронный газ начнет «отставать» от ионного газа, и, таким образом, возникнет магнитное поле.

Структура этого магнитного поля естественным образом будет соответствовать конфигурации конвективного движения, то есть, в нашем случае возникнут тороидальные поля, симметрично расположенные относительно экватора (в двух экваториальных ячейках) и имеющие противоположные направления по азимуту.

Вместе с тем, нарушение равномерной конвекции приведет к отклонению в «работе» тахоклина, что придаст движению ионов некоторую результирующую азимутальную составляющую скорости. Поэтому общее магнитное поле приобретет в дополнение к тороидальной составляющей еще и дипольную составляющую.

И даже после прекращения возмущающего воздействия на конвекцию и восстановления первоначальной скорости ионов, магнитное поле не исчезнет, так как электронный газ за время воздействия, хоть и не сразу, но тоже приобретет дополнительную скорость.

Картина возникающих электрических токов и магнитных полей, учитывая вышесказанное, схематически изображена на рис. 9.

Таким образом, спиральная форма электрических токов в области экваториальных конвективных ячеек создает общее дипольное магнитное поле и одновременно тороидальные поля разных направлений.

Поэтому группы темных пятен, находящиеся с разных сторон от экватора имеют противоположные полярности магнитных полей, как это показано на рис. 9 (справа).

В то же время пятна, образующиеся в относительно больших широтах, как правило, являются одиночными и имеют противоположные полярности в северном и южном полушариях. Как уже отмечалось выше, эти одиночные пятна напоминают «перевернутые» земные циклоны (с нижней стороны от фотосферы) и существуют относительно долго.

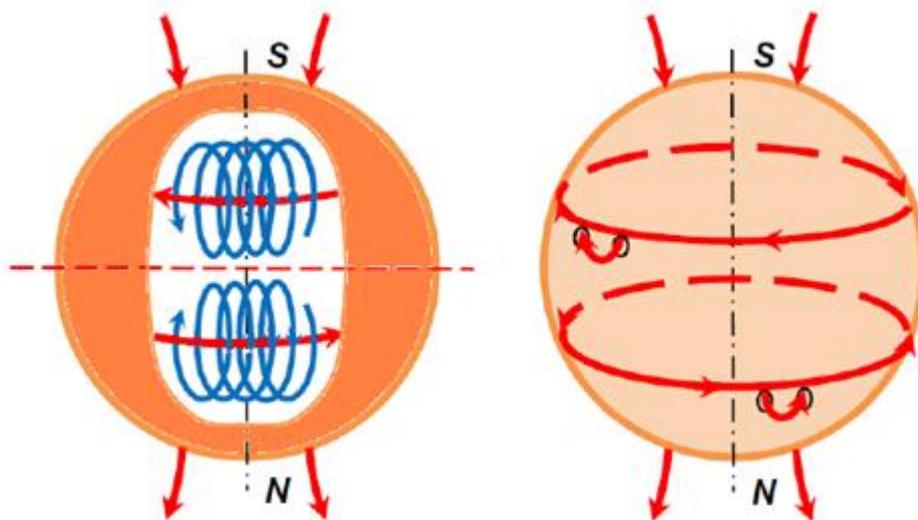


Рис. 9. Спиралеобразные токи в экваториальных конвективных ячейках создают тороидальные магнитные поля с противоположной полярностью в северном и южном полушариях, а также общее дипольное поле Солнца.

Во время каждого максимума солнечной активности (каждые ~11 лет) происходит изменение направления магнитных полей на противоположное, вследствие чего период изменения полей оказывается удвоенным (~22 года).

Такое «странное» поведение магнитных полей Солнца является типичным примером зависимости развития процесса от его предыстории.

Ключевым механизмом в данном случае является влияние силы Лоренца на движущиеся заряды, которая «закручивает» их траектории в зависимости от действующего направления магнитного поля.

Как работает этот механизм?

При увеличении солнечной активности происходит увеличение скорости конвективного движения, что создает движение ионов относительно магнитного поля. Соответственно возникает сила Лоренца, закручивающая траектории ионов вокруг силовых линий поля, и которая, таким образом, приводит в итоге к уменьшению результирующего магнитного поля.

Далее, из-за уменьшения потока тороидального магнитного поля  $B$ , в поперечном сечении возникает циркуляция электрического поля  $E$

$$\operatorname{rot} E = -\frac{dB}{dt}, \quad \oint E dl = -\frac{d}{dt} \oint B ds,$$

переориентирующая потоки электронов, которые в результате начинают двигаться по тем же траекториям, но в противоположном направлении.

Следовательно, картина токов и полей зеркально изменяется (рис. 10).

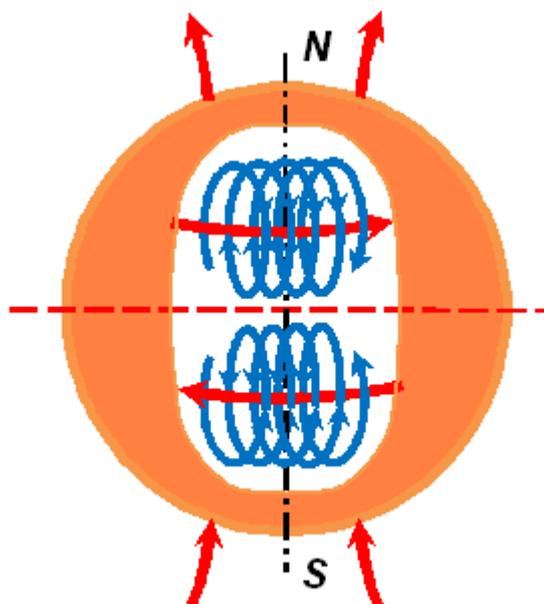


Рис. 10. Изменение направления магнитных полей Солнца вызвано переориентацией токов в экваториальных конвективных ячейках.

В действительности процесс переориентации токов и магнитных полей Солнца происходит несколько сложнее, чем в приведенной схеме.

После прохождения максимума солнечной активности, очевидно, происходит некоторая коррекция токов и полей. Однако эта коррекция не критична, поскольку спад солнечной активности происходит намного медленнее, чем подъем (в среднем в полтора раза).

Кроме того, как уже упоминалось выше, солнечная активность в северном и южном полушариях обычно имеет разную интенсивность и заметный «сдвиг по фазе». По этой причине нередко наблюдается «двугорбая» кривая солнечной активности с разной высотой максимумов.

Таким образом, процесс изменения полярности магнитных полей Солнца, как правило, происходит последовательно – сначала в одном полушарии, а потом в другом полушарии.

Соответственно в течение полутора - двух лет во время максимальной солнечной активности можно наблюдать сложную картину магнитных полей: общее поле напоминает квадрупольное, а тороидальные поля при этом имеют одинаковое направление (рис. 11).

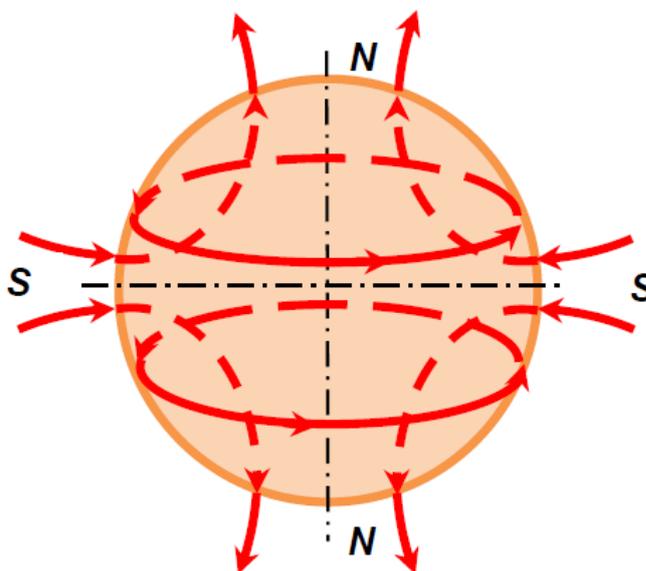


Рис. 11. Из-за несинхронности изменения направления магнитных полей в северном и южном полушариях, на максимуме солнечной активности общее магнитное поле напоминает квадрупольное, а тороидальные поля имеют одинаковое направление.

В завершение этого раздела еще раз акцентируем внимание на том, что скорости конвективного движения плазмы (как и скорость вращательного движения Солнца) в районе экваториальных ячеек на несколько порядков превосходят относительные скорости ионов и электронов плазмы, порождающие дипольное и тороидальные магнитные поля.

Поэтому в среднем магнитное поле не только вращается вместе с Солнцем, но и одновременно движется вместе с течением плазмы в пределах конвективных ячеек.

В то же время дипольное поле ориентировочно на два порядка меньше, чем тороидальные поля. В основном это связано с тем, что шаг спирального тока существенно меньше поперечных размеров спирали.

Это говорит о слабом результирующем эффекте разнонаправленного воздействия тахоплина на азимутальную скорость плазмы в конвективных ячейках Солнца.

#### **4. Из чего сделано солнечное «одеяло»?**

Как уже было сказано выше, вещество, из которого состоит тепловой экран Солнца (одновременно его можно рассматривать как «поверхность» Солнца или солнечное «одеяло») напоминает вещество шаровой молнии.

Природа этого явления в самом общем виде была рассмотрена в работе [5] еще в 2006 году. Из проведенного тогда анализа следовал вывод о том, что особое состояние вещества в шаровой молнии можно сравнить с жидкостью, в которой наблюдается так называемый ближний порядок в расположении атомов. Однако механизм установления этого ближнего порядка в данном случае совершенно иной, чем в обычных жидкостях.

Выражаясь «научно» можно сказать, что шаровая молния является макроскопическим квантовым эффектом – сверхтекучестью возбужденных состояний атомов газов, составляющих атмосферу.

Поэтому, например, шаровая молния может двигаться против ветра.

А во многих случаях она, действительно, ведет себя как жидкость.

С другой стороны, такое состояние газа можно рассматривать как его «смесь» с излучением (с фотонами). Устойчивость такой смеси основана на интенсивном взаимодействии атомов и энергии излучения.

Электромагнитные волны, каковым является излучение, осуществляют упорядочение расположения атомов, а упорядоченное расположение атомов в свою очередь составляет неизлучающую систему, которая удерживает излучение внутри этого особого состояния вещества (рис. 12).

Естественно, что такая неизлучающая система, в силу конечности размеров самих областей ближнего порядка, а также из-за различного рода нарушений в упорядоченной структуре, все-таки теряет энергию.

По этой причине шаровая молния имеет ограниченное время жизни и либо тихо гаснет, либо взрывается в результате одномоментной потери устойчивости структуры и выброса всей удерживаемой энергии.

В условиях фотосферы Солнца аналогичное состояние вещества в виде квантовой жидкости (сокращенно – КЖ) постоянно поддерживается излучением, приходящим из глубин самого Солнца.

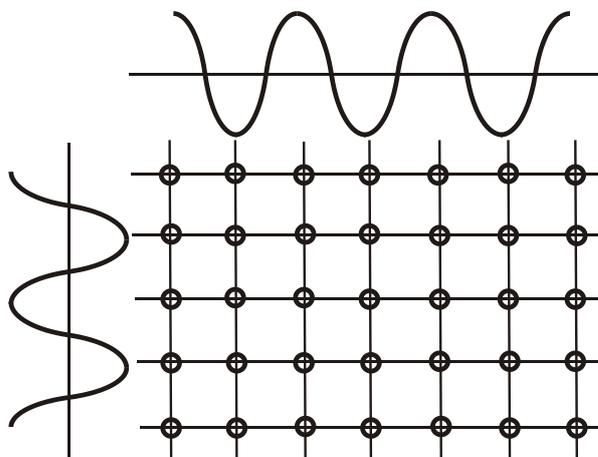


Рис. 12. Электромагнитные волны осуществляют упорядочение расположения атомов, а упорядоченное расположение атомов, в свою очередь, удерживает излучение внутри этого особого состояния вещества.

В нижней части фотосферы, где плотность больше, и расстояния между атомами соответственно меньше, в образовании КЖ задействованы фотоны с меньшей длиной волны, то есть, имеющие большую энергию.

В результате, упорядоченные структуры КЖ в нижней части фотосферы оказываются более прочными, а гранулы имеют самые большие размеры (так называемые «супергранулы»).

Приведем оценочный расчет для самой нижней наиболее плотной части фотосферы, в которой происходит взаимодействие атомов водорода с наиболее коротковолновым излучением, соответствующим потенциалу ионизации водорода.

Длина волны кванта излучения, имеющего энергию, достаточную для ионизации водорода, определяется из формулы для энергии кванта:

$$h\nu = \varphi_i e, \quad \nu = \frac{c}{\lambda}, \quad \lambda = \frac{hc}{\varphi_i e}.$$

Здесь  $\varphi_i$  – потенциал ионизации водорода;  $\lambda$ ,  $\nu$  – длина волны и частота кванта;  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света,  $e$  – заряд электрона.

После подстановки конкретных величин, получаем длину волны фотона  $\lambda = 0,94 \cdot 10^{-7} \text{ м}$  (или  $94 \text{ нм}$ ), соответствующую потенциалу ионизации водорода ( $13,6 \text{ эВ}$ ).

Если исходить из упрощенной схемы трехмерного ближнего порядка расположения атомов, подобной рис. 12 (каждый атом находится в пучности электромагнитной волны), то ориентировочная концентрация атомов может быть получена из формулы:

$$n = \left( \frac{2}{\lambda} \right)^3 \approx 10^{22} \text{ м}^{-3},$$

что ориентировочно соответствует имеющимся фактическим данным о концентрации атомов водорода в фотосфере.

Чем ближе к внешней стороне фотосферы, тем плотность меньше, а расстояния между атомами больше. Поэтому здесь в упорядочении структур квантовой жидкости участвуют более длинноволновые фотоны с меньшей энергией, вследствие чего связи внутри КЖ становятся слабее, а гранулы делаются все мельче.

Таким образом, в образовании относительно тонкого слоя фотосферы ( $\sim 300\text{-}500 \text{ км}$ ) оказывается задействованным почти весь спектр излучения Солнца за исключением рентгеновского излучения (энергия квантов которого превышает энергию ионизации водорода).

«Принудительное» удержание атомов водорода в определенном энергетическом состоянии, происходящее в КЖ, является тем механизмом, который обеспечивает рассеяние и отражение большей части приходящего из глубин Солнца излучения (роль теплового экрана).

А с другой стороны, этот же механизм предотвращает ступенчатое возбуждение и ионизацию атомов водорода, в результате чего фотоны фактически «заполняют» объем фотосферы, подобно тому, как происходит взаимодействие с «абсолютно черным телом».

Это хорошо видно из спектра излучения Солнца (рис. 13).

Почти весь спектр совпадает с излучением абсолютно черного тела, роль которого берет на себя фотосфера, и только наиболее коротковолновая часть ( $\lambda \leq 94 \text{ нм}$ ) присутствует как бы обособленно, не подчиняясь общей закономерности.

Итак, акцентируем еще раз внимание на том, что фотосфера, как и квантовая жидкость, из которой она состоит, в силу самой природы этого состояния вещества, имеет ряд специфических свойств:

- КЖ обладает поверхностным натяжением, вследствие чего в фотосфере образуются так называемые гранулы (рис. 14);
- Из-за наличия ближнего порядка, КЖ имеет повышенную вязкость в сравнении с газом той же плотности;
- КЖ не проводит электрический ток, то есть, является электрическим изолятором;
- КЖ ведет себя как немагнитный материал.
- Фотосфера обладает свойствами абсолютно черного тела.

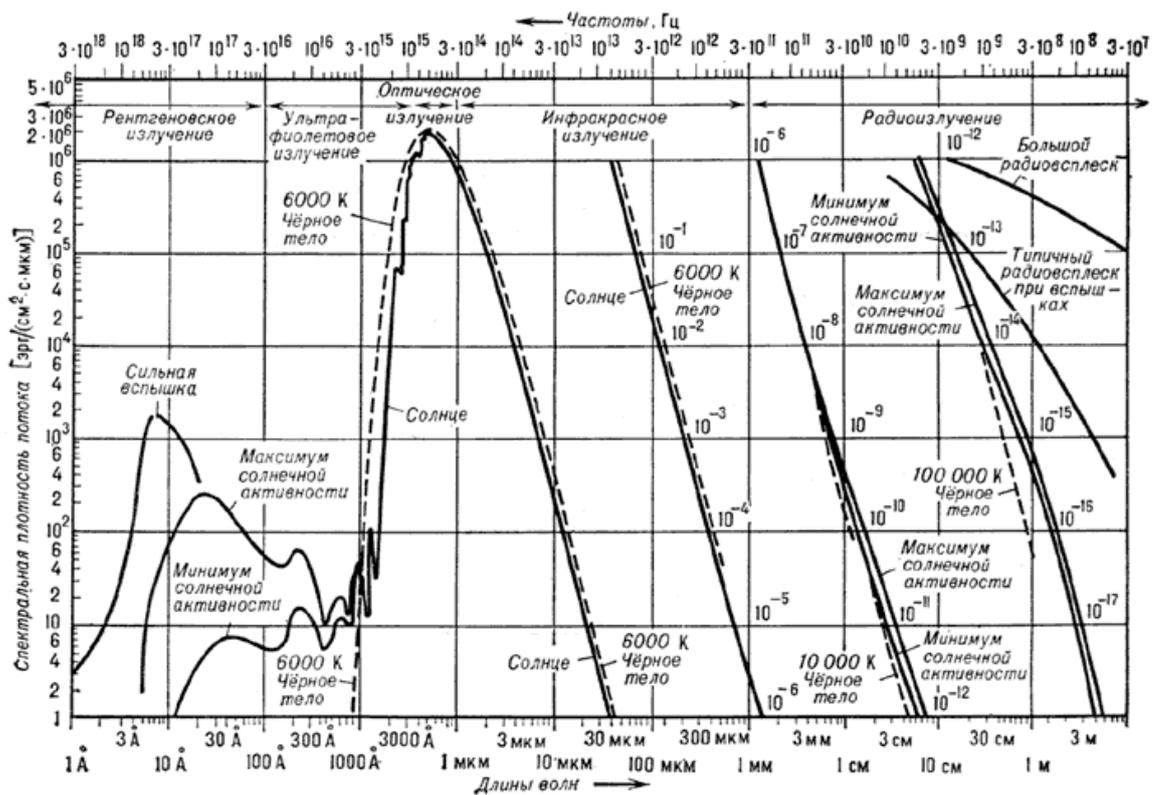


Рис. 13. Спектр излучения Солнца. Штриховые линии – распределение энергии в спектре абсолютно черного тела с температурой  $6000\text{ К}$ .

Все эти свойства непосредственно проявляются в многочисленных эффектах, наблюдаемых на Солнце, и которые было бы затруднительно объяснить какими-либо другими физическими механизмами.

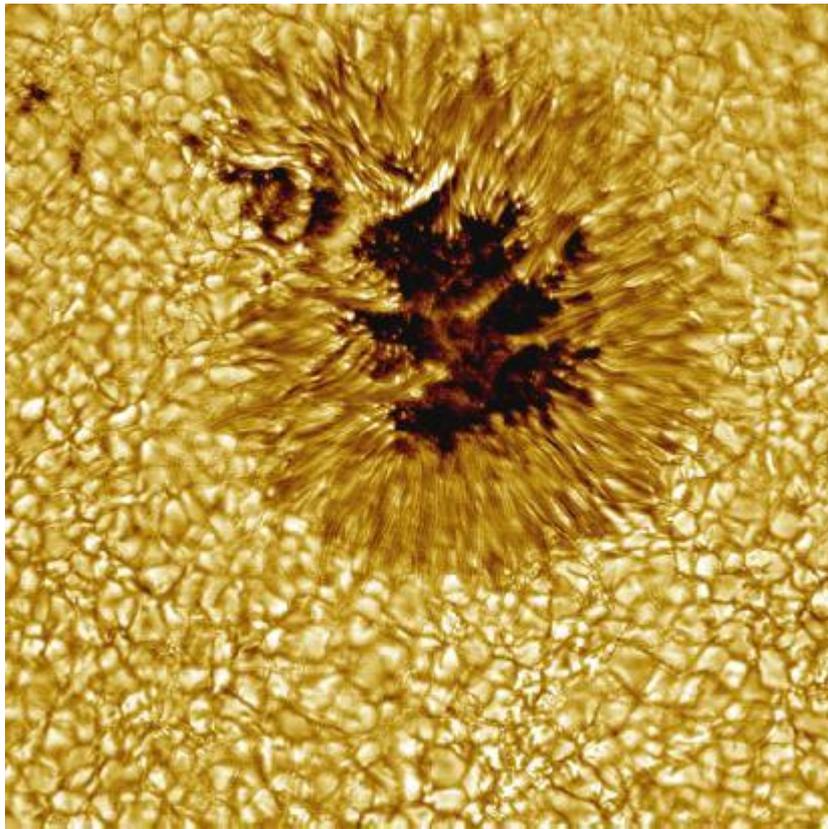


Рис. 14. Темное пятно на фоне гранулированной поверхности фотосферы.

В частности, свидетельством особых свойств «вещества» фотосферы является отсутствие какого-либо взаимодействия с магнитными полями и электрическими токами. Это особенно заметно при проникновении за пределы фотосферы «жгутов» магнитных силовых линий и плазмы (рис. 15).

А вот еще одно из таких наиболее ярких проявлений.

Квантовая жидкость внутри гранул совершает конвективное движение – в центре происходит движение вверх, а по бокам вдоль границ гранул наблюдается обратное движение – сверху вниз.

Однако спикулы, состоящие из плазмы, «прорываются» вверх как раз по границам между гранулами, где поток конвективного движения идет вниз.

Понять это «странное» явление можно только на основе того факта, что гранулы фотосферы являются обособленными областями, состоящими из КЖ с сильным поверхностным натяжением.

По этой причине плазма спикул не смешивается с веществом гранул, а, наоборот, с огромной скоростью «протискивается» между гранулами,

врываясь в хромосферу со скоростью порядка 20 км/с, и далее устремляется в высоту на 5 - 20 тыс. км.

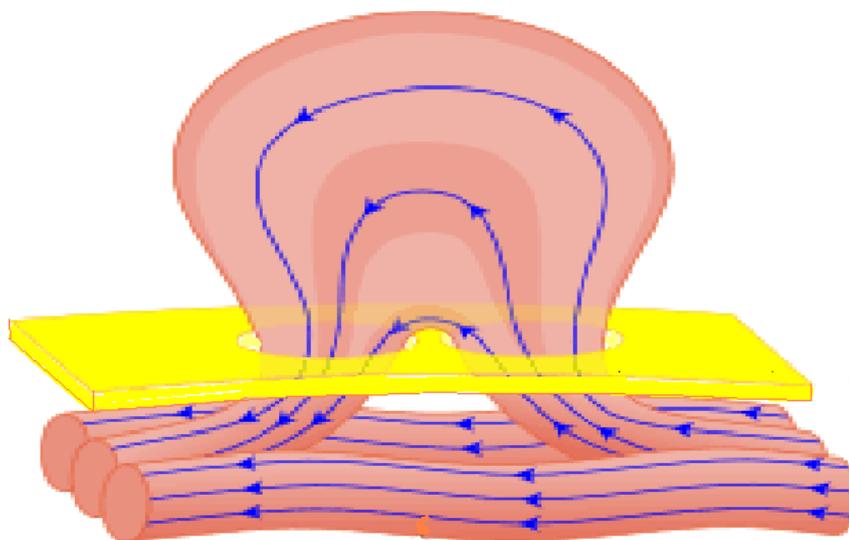


Рис. 15. Проникновение «жгута» магнитного поля и плазмы сквозь фотосферу.

Такие колонны плазмы диаметром 500 - 1200 км живут в среднем 5 -10 минут, что по времени оказывается сопоставимым с периодом постоянно происходящих волнообразных колебаний всей поверхности Солнца.

Этот факт вполне закономерно порождает предположение о вероятной взаимосвязи между этими явлениями.

Действительно, спикулы, «протискиваясь» между гранулами, поддерживают колебания поверхности Солнца, а колебания, в свою очередь, «помогают» плазме проникать между гранулами. В результате возникает положительная обратная связь в автоколебательном процессе.

В этой связи напомним, что на поверхности Солнца одновременно существуют около миллиона спикул, которые занимают порядка 1% ее поверхности, но, что особенно важно, большинство из них располагается вдоль границ супергранул и образует так называемую хромосферную сетку, покрывающую всю поверхность Солнца.

## 5. Заключение

Итак, именно солнечное «одеяло» является тем ключевым элементом физики Солнца, который дает возможность логически связать между собой всю совокупность явлений и фактов, кажущихся на первый взгляд столь противоречивыми и даже парадоксальными.

Особое состояние вещества, образующее «одеяло», – сверхтекучесть энергетических состояний, существующее в гранулах фотосферы, придает этой части структуры Солнца ряд замечательных свойств:

- Особое состояние водорода в фотосфере фактически является «смесью» водорода с излучением (с фотонами). Устойчивость такой смеси основана на взаимном удержании атомов и энергии излучения. Электромагнитные волны, каковым является излучение, осуществляют упорядочение расположения атомов, а упорядоченное расположение атомов, в свою очередь, образует неизлучающую систему, которая удерживает излучение внутри структурированного вещества.
- В условиях фотосферы Солнца это состояние вещества в виде квантовой жидкости (КЖ) постоянно поддерживается излучением, приходящим из глубин самого Солнца.
- КЖ обладает поверхностным натяжением, вследствие чего в фотосфере образуются гранулы;
- Из-за наличия ближнего порядка, КЖ имеет повышенную вязкость в сравнении с газом той же плотности;
- «Принудительное» удержание атомов водорода в определенном энергетическом состоянии, происходящее в КЖ, является тем физическим механизмом, который обеспечивает рассеяние и отражение большей части приходящего из глубин Солнца излучения, чем и обеспечивается роль фотосферы как теплового экрана.
- Этот же механизм предотвращает ступенчатое возбуждение и ионизацию атомов водорода, в результате чего фотоны

фактически «заполняют» объем фотосферы, подобно тому, как это происходит с «абсолютно черным телом».

- КЖ не проводит электрический ток, то есть, является электрическим изолятором;
- КЖ ведет себя как немагнитный материал.

Благодаря этим свойствам фотосфера играет роль «поверхности» Солнца и теплового экрана («одеяла»). Процессы, происходящие над и под фотосферой, разительно отличаются друг от друга.

Под фотосферой располагаются конвективные ячейки (две – полярные и две экваториальные), а над ней простирается хромосфера со спикулами, переходящая в солнечную корону.

Важно, что колебания температуры и скорости конвективного движения плазмы захватывают в основном лишь внешние слои конвективных ячеек, которые слабо перемешиваются с сердцевинными областями, имеющими некоторые усредненные характеристики.

С этим связаны периодические «закипания» плазмы вдоль экватора и особенности дифференциального вращения Солнца.

В качестве теплового экрана фотосфера обеспечивает стабильность температуры Солнца, «реагируя» на перегрев плазмы.

При максимуме солнечной активности перегретая «закипающая» плазма увеличивает количество различного рода дефектов - трещин и разрывов в «одеяле». В результате плазма в зоне конвекции охлаждается и наступает период относительно спокойного Солнца.

В этой спокойной фазе солнечной активности дефекты «одеяла» затягиваются, и плазма в конвективной зоне постепенно снова нагревается. В среднем через 11 лет плазма опять перегревается, и наступает фаза повышенной активности Солнца. Потом весь процесс повторяется сначала.

Результатом циклического процесса нагрева-охлаждения является периодическое увеличение скорости конвекции плазмы и связанное с этим изменение полярности магнитного поля.

Здесь мы имеем дело с типичным примером зависимости развития процесса от его предыстории.

Ключевым механизмом в данном случае является влияние силы Лоренца на движущиеся заряды, которая «закручивает» их траектории в зависимости от действующего в это время направления магнитного поля.

При увеличении солнечной активности скорость конвективного движения возрастает, что порождает движение ионов относительно магнитного поля. Соответственно возникает сила Лоренца, закручивающая траектории ионов вокруг силовых линий магнитного поля, а это всегда приводит в итоге к уменьшению результирующего поля.

Далее, из-за уменьшения потока тороидального магнитного поля, в поперечном сечении возникает циркуляция электрического поля, переориентирующая потоки электронов, которые в результате начинают двигаться по тем же траекториям, но в противоположном направлении.

Таким образом, картина токов и полей зеркально изменяется.

Солнечная активность в северном полушарии и в южном полушарии обычно имеет разную интенсивность, что приводит к заметному «сдвигу» активности полушарий по времени.

Вследствие этого процесс изменения полярности общих магнитных полей Солнца, как правило, происходит последовательно – сначала в одном полушарии, а потом в другом полушарии.

Соответственно в течение полутора - двух лет во время максимальной солнечной активности можно наблюдать сложную картину магнитных полей: общее поле напоминает квадрупольное, а тороидальные поля при этом имеют одинаковое направление.

При анализе магнитного поля Солнца были учтены базовые свойства взаимодействия поля и плазмы:

- Относительное движение электронов и ионов плазмы создает магнитное поле. Но так как скорость этого относительного движения очень мала, то магнитное поле не только вращается вместе с Солнцем, но и «дрейфует» вместе с конвективным движением плазмы.

- Газ электронов и газ ионов, находясь в относительном движении, «пронизывают» друг друга практически без «трения». Поэтому процесс естественного затухания магнитного поля оказывается очень длительным и в масштабах Солнца может занимать многие десятилетия.

Анализ свойств гранулированного состояния вещества в фотосфере позволил сделать вывод о возможной взаимосвязи между волнообразными колебаниями поверхности Солнца и свойствами спикул.

Спикулы, «протискиваясь» между гранулами, поддерживают колебания поверхности Солнца, а колебания, в свою очередь, «помогают» плазме проникать между гранулами. В результате формируется положительная обратная связь в автоколебательном процессе.

Косвенным подтверждением такой взаимосвязи является то, что на поверхности Солнца одновременно существуют около миллиона спикул, которые занимают порядка 1% ее поверхности, но, что особенно важно, большинство из них располагается вдоль границ супергранул и образует так называемую хромосферную сетку, покрывающую всю поверхность Солнца.

В заключение еще раз подчеркнем главный вывод из проведенного анализа. Он заключается в том, что в физике Солнца существует ключевой элемент – своеобразное солнечное «одеяло», состоящее из квантовой жидкости. Роль этого ключевого элемента играет гранулированная область Солнца, называемая фотосферой.

Вывод о ключевой роли свойств фотосферы дает возможность не только систематизировать и объяснить имеющиеся данные наблюдений, но и, несомненно, может стать основой для дальнейших исследований.

## Литература

1. Физические величины. Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Гибсон Э. Спокойное Солнце. Пер. с англ./Под ред. Э. В. Кононовича. - М.: Наука, 1977.
3. Верин О.Г. Физика атмосферных и океанических течений.  
<http://files.library.by/files/1484596741.pdf>
4. Физическая энциклопедия. Солнце.  
[http://femto.com.ua/articles/part\\_2/3751.html](http://femto.com.ua/articles/part_2/3751.html)
5. Верин О.Г. Энергия. Вещество и поле. М. Контур-М. 2006 г.