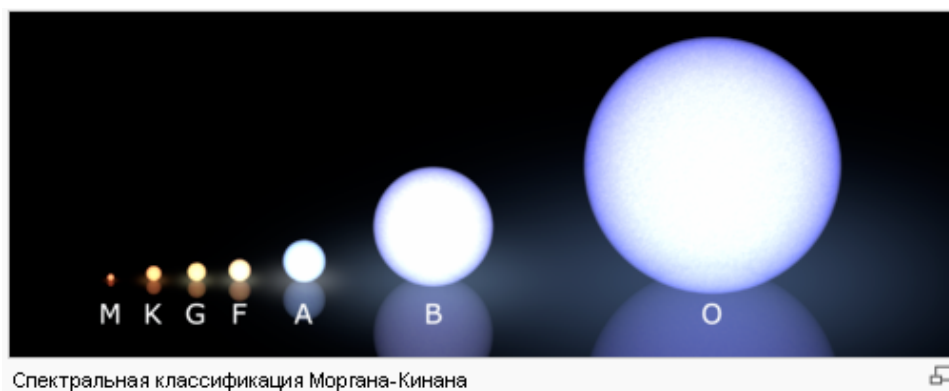


Лекция 3. ЗВЕЗДЫ, СОЛНЦЕ.

В 3-ей лекции обсуждаются особенности звезд и Солнца, спектральные классы, Главная последовательность звезд, Солнечные пятна, вспышки, активность.

Спектральные классы — классификация звёзд по спектру излучения, в первую очередь, по температуре фотосферы.

В начальном приближении, сплошной спектр излучения звезды близок к излучению абсолютно чёрного тела с температурой, равной температуре её фотосферы, которую можно оценить по закону смещения Вина, но для удалённых звёзд этот метод неприменим из-за неравномерного поглощения света различных участков спектра межзвёздной средой. Более точным методом является оптическая спектроскопия, позволяющая наблюдать в спектрах звёзд линии поглощения, имеющие различную интенсивность в зависимости от температуры и типа звезды. Для некоторых типов звёзд в их спектрах наблюдаются и линии испускания.



Классы Анджело Секки

В 1860-1879-х годах пионер звёздной спектроскопии Анджело Секки (итал. *Pietro Angelo Secchi*) создал первую классификацию звёздных спектров. В 1866 году он разбил наблюдаемые спектры звёзд на три класса в порядке убывания температуры поверхности звезды и соответствующего изменения цвета. В 1868 году Секки открыл углеродные звезды, которые выделил в отдельную четвёртую группу. А в 1877 году он добавил пятый класс.

- **Класс I** — белые и голубые звезды с широкими линиями поглощения водорода в спектре, такие, как Вега и Альтаир; включает в себя современные классы A и начало класса F. **Класс I, подтип Ориона** — звезды класса I с узкими линиями в спектре вместо широких полос, такие, как Ригель и γ Ориона; соответствует началу современного класса B.
- **Класс II** — жёлтые и оранжевые звёзды со слабыми линиями водорода, но с отчётливыми линиями металлов, такие, как Солнце, Арктур и Капелла; включает в себя современные классы G и K, а также конец класса F.
- **Класс III** — оранжевые и красные звёзды, в спектре которых линии образуют полосы, темнеющие в сторону синего, такие, как Бетельгейзе и Антарес; соответствует современному классу M.
- **Класс IV** — красные звёзды с сильными полосами и линиями углерода, углеродные звёзды.
- **Класс V** — звёзды с эмиссионными линиями, такие, как γ Кассиопеи и β Лиры.

Позднее Эдуард Пикеринг изменил определение класса V, разделив его на горячие звёзды с эмиссионными линиями гелия, углерода и азота (звёзды Вольфа-Райне) и планетарные туманности.

Предложенное Секки деление спектров было общепринятым вплоть до конца 1890-х годов, когда постепенно к середине XX века было заменено Гарвардской классификацией, которая описывается ниже.

Современная (гарвардская) спектральная классификация звёзд разработана в Гарвардской обсерватории в 1890-1924 годах. Она является температурной классификацией, основанной на виде и относительной интенсивности линий поглощения и испускания спектров звёзд.

Основная (гарвардская) спектральная классификация звёзд

Класс	Температура, К	Истинный цвет	Видимый цвет ^[9]	Масса, M_{\odot}	Радиус, R_{\odot}	Светимость, L_{\odot}	Линии водорода	Доля* в глав. послед., % ^[10]	Доля* на ветв. бел.к., % ^[10]	Доля* гигантских, % ^[10]
O	30 000—60 000	голубой	голубой	60	15	1 400 000	слабые	~0,00003084	-	-
B	10 000—30 000	бело-голубой	бело-голубой и белый	18	7	20 000	средне	0,1214	21,8750	-
A	7500—10 000	белый	белый	3,1	2,1	80	сильны	0,6068	34,7222	-
F	6000—7500	жёлто-белый	белый	1,7	1,3	6	средне	3,03398	17,3611	7,8740
G	5000—6000	жёлтый	жёлтый	1,1	1,1	1,2	слабы	7,6456	17,3611	25,1969
K	3500—5000	оранжевый	желтовато-оранжевый	0,8	0,9	0,4	очень слабы	12,1359	8,6806	62,9921
M	2000—3500	красный	оранжево-красный	0,3	0,4	0,04	очень слабы	76,4563	-	3,9370

Йеркская классификация с учётом светимости (МКК)

Дополнительным фактором, влияющим на вид спектра, является плотность внешних слоёв звезды, зависящая, в свою очередь от её массы и плотности, то есть, в конечном итоге, от светимости. Особенно сильно зависят от светимости SrII, BaII, FeII, TiII, что приводит к различию в спектрах звёзд-гигантов и карликов одинаковых гарвардских спектральных классов.

Зависимость вида спектра от светимости отражена в более новой йеркской классификации, разработанной в Йеркской обсерватории (Yerkes Observatory) У. Морганом, Ф. Кинаном и Э. Келман, называемой также МКК по инициалам её авторов. В соответствии с этой классификацией звезде приписывают гарвардский спектральный класс и класс светимости:

- Ia+ или 0 - гипергиганты
- I, Ia, Iab, Ib - сверхгиганты
- II, IIa, IIb – яркие гиганты
- III, IIIa, IIIab, IIIb - гиганты
- IV- субгиганты
- V, Va, Vb - карлики (звезды главной последовательности)
- VI - субкарлики
- VII – белые карлики

Таким образом, если гарвардская классификация определяет абсциссу диаграммы Герцшпрунга-Рассела, то йеркская - положение звезды на этой диаграмме. Дополнительным преимуществом йеркской классификации является возможность по виду

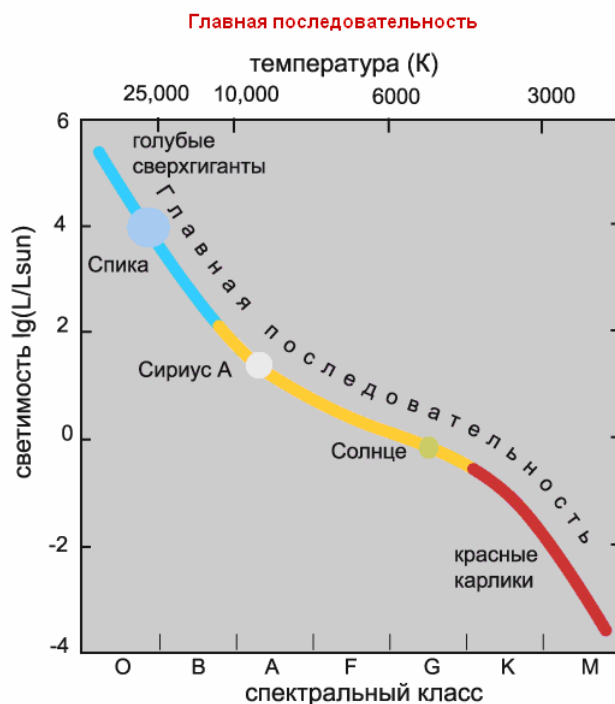
спектра звезды оценить её светимость и, соответственно, по видимой величине — расстояние (метод спектрального параллакса).

Солнце, будучи жёлтым карликом, имеет йеркский спектральный класс **G2V**.

СОЛНЦЕ.

Солнце - центральное тело Солнечной системы - представляет собою горячий газовый шар. Оно в 750 раз превосходит по массе все остальные тела Солнечной системы вместе взятые. Именно поэтому всё в Солнечной системе можно приближенно считать вращающимся вокруг Солнца. Землю Солнце "перевешивает" в 330 000 раз. На солнечном диаметре можно было бы разместить цепочку из 109 таких планет, как наша Земля. Солнце - ближайшая к Земле звезда, оно - единственная из звезд, чей видимый диск различим невооруженным глазом. Все остальные звезды, удаленные от нас на световые года, даже при рассмотрении в мощные телескопы, не открывают никаких подробностей своих поверхностей. Свет от Солнца до нас доходит за 8 с третьей минут. По одной из гипотез, именно вместе с Солнцем образовалась наша планетная система, Земля, а затем и жизнь на ней.

Солнце несется в направлении созвездия Геркулеса по орбите вокруг центра нашей Галактики, преодолевая каждую секунду больше 200 км. Солнце и центр Галактики разделяет расстояние в 25 000 световых лет. Тот же путь пролегает от Солнца к окраинам Галактики. Наша звезда расположилась вблизи галактической плоскости, недалеко от границы одного из спиральных рукавов. Поэтому, прогуливаясь в парке и неторопливо оставляя за спиной по 3 км за час, мы одновременно вертимся вместе с поверхностью нашей планеты вокруг земной оси со скоростью 23 км в минуту на широте Москвы, вертимся с Землей вокруг Солнца, каждую секунду оставляя позади 30 км, и, наконец, со скоростью 230 км в секунду бороздим просторы нашей Галактики. Как и все звезды, Солнце родилось в сжавшейся газопылевой туманности. Когда столь грандиозная масса ($2 \cdot 10^{30}$ кг) сжималась, она сама себя сильно разогрела внутренним давлением до температур, при которых в ее центре смогли начаться термоядерные реакции. В центральной части температура на Солнце равна 15 000 000 К, а давление достигает сотни миллиардов атмосфер.



Солнце в начале своей жизни состояло из водорода. Именно водород в ходе термоядерных реакций превращается в гелий, при этом, выделяется энергия, излучаемая Солнцем. Солнце принадлежит к типу звезд, называемых желтыми карликами. Оно - звезда главной последовательности и относится к спектральному классу G2. Масса одинокой звезды всегда определяет ее судьбу. За время своей жизни (5 миллиардов лет), в центре нашего светила, где температура достаточно высока, сгорело около половины всего имеющегося там водорода. Солнцу осталось жить примерно столько же, 5 миллиардов лет.

После того как в центре светила водород будет на исходе, Солнце увеличится в размерах, станет красным гигантом. Это сильнейшим образом скажется на Земле: повысится температура, океаны выкипят, жизнь станет невозможной в той форме, в какой мы ее знаем сейчас. Наша звезда закончит свою жизнь белым карликом, превратившись в новую планетарную туманность, форма которой может оказаться весьма причудливой благодаря влиянию планет.

Радиус	$6.9599 \cdot 10^{10}$ см
Объем	$1.4122 \cdot 10^{33}$ см ³
Площадь поверхности	$6.087 \cdot 10^{22}$ см ²
Масса	$1.989 \cdot 10^{33}$ г
Средняя плотность	1.409 г/см ³
Ускорение силы тяжести на поверхности	$2.7398 \cdot 10^4$ см/с ²
Центробежное ускорение на экваторе	0.578 см/с ²
Светимость	$3.826 \cdot 10^{33}$ эрг/с
Поток излучения с единицы поверхности	$6.27 \cdot 10^{10}$ эрг/см ² с
Момент инерции	$5.7 \cdot 10^{53}$ г·см ²
Угловая скорость вращения (на широте 16°)	$2.865 \cdot 10^{-6}$ рад/с
Момент количества движения	$1.63 \cdot 10^{48}$ г·см ² /с
Энергия вращения	$2.4 \cdot 10^{42}$ эрг
Работа рассеяния вещества Солнца в бесконечность	$6.6 \cdot 10^{48}$ эрг
Полная внутренняя лучистая энергия	$2.8 \cdot 10^{47}$ эрг
Скорость освобождения на поверхности	617.7 км/с
Магнитное поле вблизи полюсов при мин. пятен	1 Гс
Спектральный тип	G2V
Эффективная температура	5770 К
Скорость движения относительно ближайших звезд	19.7 км/с
Возраст	$5 \cdot 10^9$ лет
Температура, плотность, давление в центре	$15 \cdot 10^6$ К; 160 г/см ³ ; $3.4 \cdot 10^{17}$ дин/см ³

Солнце, это звезда спектрального типа G2V, представляет собой плазменный шар в центре Солнечной системы. Солнце содержит 99.86% всей массы системы. Масса Солнца $M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{33}$ г, радиус $R_{\odot} = 6.96 \cdot 10^{10}$ см, он в 109 раз больше земного. Солнце состоит на 68 % из водорода и 30 % - гелия. Все остальные элементы составляют 2% его массы. Температура в центре Солнца 16 млн. градусов. Принято считать, что энергия Солнца реализуется за счет термоядерного синтеза гелия из водорода. Плотность солнечного вещества в его центре достигает 160 г/см³. По мере удаления от центра Солнца температура и плотность газа (плазмы) падают и на расстояниях, больших $0.7 - 0.8 R_{\odot}$, уже могут существовать нейтральные атомы, которые оказывают существенное влияние на процессы переноса тепла и излучения от центра Солнца к его периферии (см. рис. 6-1). Рисунок дает представление о

внутреннем устройстве Солнца. Очевидно, что чем глубже, тем должно быть горячее. Вопрос вызывает резкое понижение температуры на границе Солнца в т.н. фотосфере. Аналогичная ситуация наблюдается и на Земле, это известное явление температурной инверсии, но она связана с внешним источником – тем же Солнцем. Почему же такое происходит на солнечной «поверхности»? Это явление обязано интенсивному охлаждению за счет излучения, поэтому самая холодная на Солнце зона называется фотосферой. Следующий выше фотосферы газ нагревается солнечным излучением в хромосфере и медленно охлаждается в солнечной короне, которая распространяется до 5 астрономических единиц (АЕ – расстояние от Земли до солнца), т.е. практически до орбиты Юпитера. Одним словом, мы живем на Земле непосредственно в солнечной короне (СК).

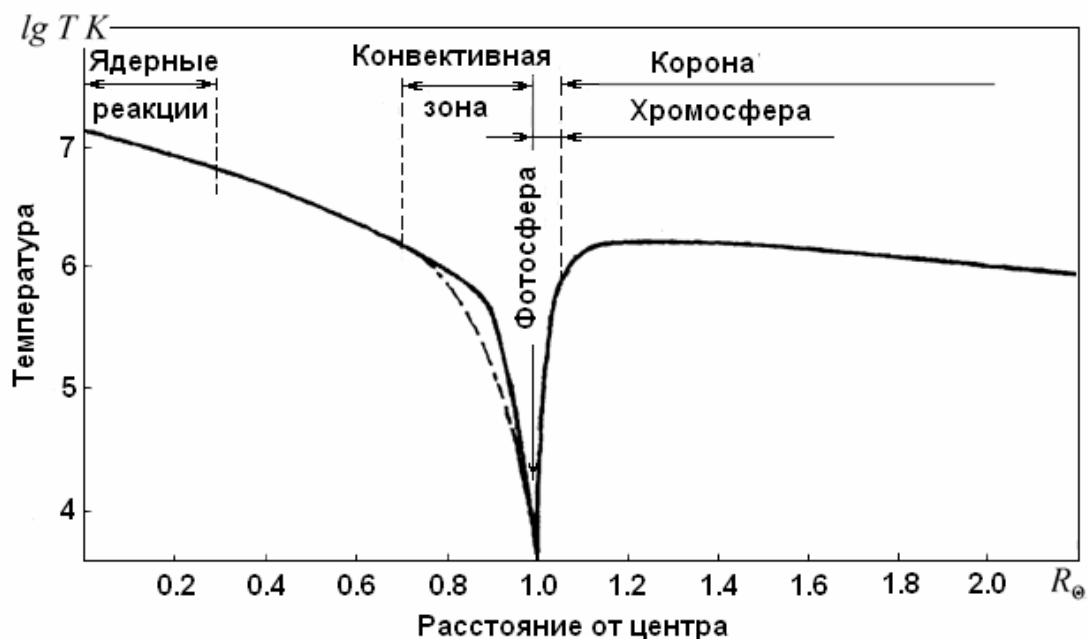


Рис. 1. Распределение температуры по радиусу Солнца и его ближайшей окрестности.

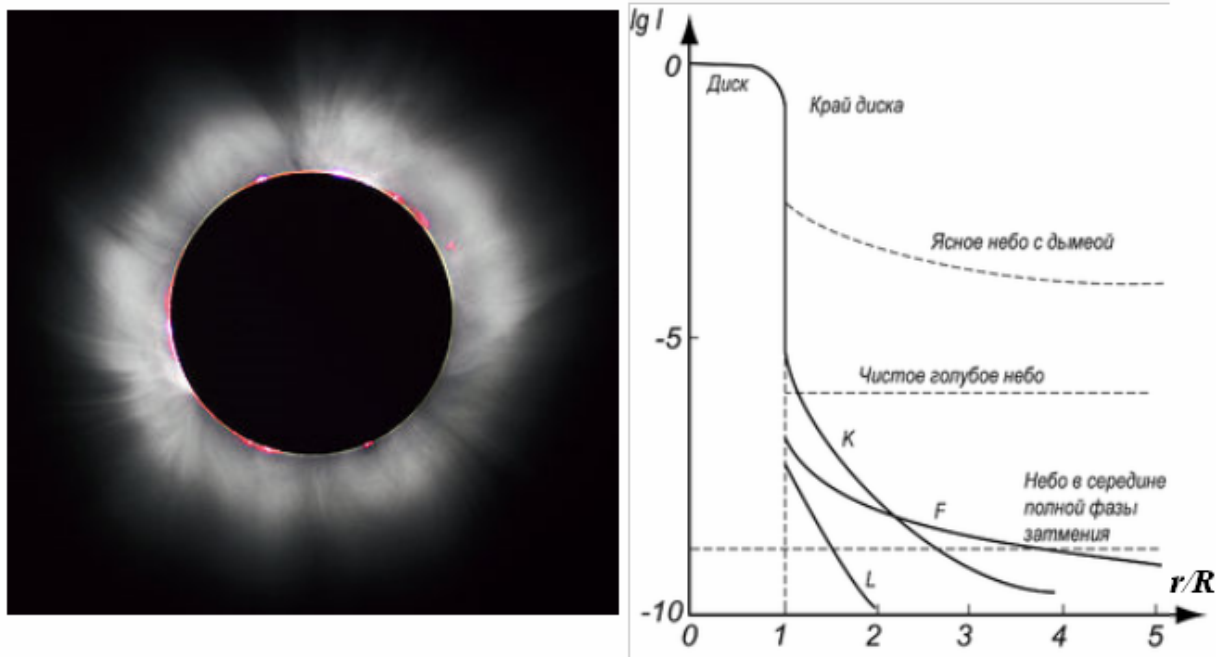
Верхняя граница короны Солнца до сих пор не установлена, на сегодняшний день ясно, что корона продолжается, по крайней мере, до границ Солнечной системы. Земля, так же, как и другие планеты, находятся внутри короны. При наблюдениях из космоса корона прослеживается на десятки градусов от Солнца и сливается с явлением зодиакального света.

Температура короны - порядка миллиона кельвинов. Причем от хромосферы она повышается до двух миллионов на расстоянии порядка 70000 км от видимой поверхности Солнца, а затем начинает убывать, достигая у Земли ста тысяч кельвинов.

Излучение солнечной короны

Интегральный блеск короны составляет от $0,8 \times 10^{-6}$ до $1,3 \times 10^{-6}$ часть блеска Солнца. Поэтому она не видна вне затмений или без технологических ухищрений. Для наблюдения Солнечной короны вне затмений используют внезатменный коронограф.

Излучение короны в основном приходится на далёкий ультрафиолетовый и рентгеновский диапазоны, непроникаемые земной атмосферой, поэтому очень большое значение имеет изучение солнечной короны с помощью космических аппаратов.



Солнечная корона, запечатленная во время полного солнечного затмения 11 августа 1999 года. Зависимость относительной яркости составляющих Солнечной короны от расстояния до края диска

Солнечная корона – внешняя, наиболее горячая и разреженная часть атмосферы Солнца. Температура СК достигает 2 млн. градусов в непосредственной близости от Солнца и падает до 100 000 К вблизи орбиты Земли. Корональная плазма полностью ионизована, её химический состав практически тот же, как в солнечной фотосфере. Концентрация плазмы солнечной короны очень мала, поэтому она не принимает участие в излучении, и именно потому столь высока её температура. В наиболее активных районах СК возникают солнечные вспышки, корональные дыры, флюкулы, спикулы, протуберанцы и т.д. (рис. 2).

Солнечная постоянная. Солнечная постоянная (СП), это полное количество лучистой энергии Солнца, падающее вне атмосферы Земли на площадку единичной площади, расположенную перпендикулярно солнечным лучам на расстоянии от Солнца, равном 1 астрономической единице. Она равна $1369 \pm 14 \text{ Вт/м}^2$. В начале 80-х годов было обнаружено, что СП меняется во времени с амплитудой 0.1-0.2 % в соответствии с изменением солнечного цикла. Уменьшение СП связано с появлением на Солнце очень больших групп пятен, увеличение СП, - с солнечными факелами. Величина СП + альбедо (способность отражения падающего излучения) Земли – определяют среднюю температуру Земли и оказывают решающее значение на климат.

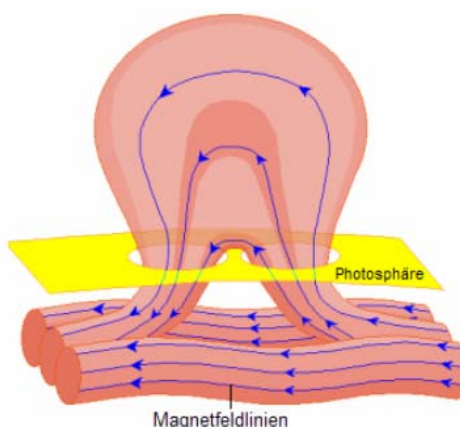
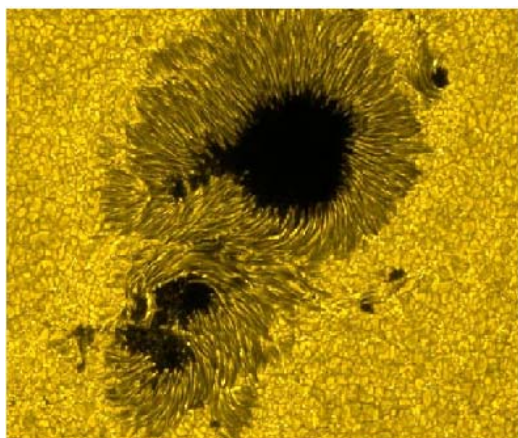
Солнечная активность - комплекс явлений и процессов, связанных с образованием и распадом в солнечной атмосфере сильных магнитных полей.

Наиболее изученный вид солнечной активности (СА) — изменение числа солнечных пятен. Первые сообщения о пятнах на Солнце относятся к наблюдениям 800 г. до н. э. в Китае, первые рисунки относятся к 1128 г. В 1610 г. астрономы начали использовать телескоп для наблюдения Солнца. Первоначальные исследования фокусировались на природе пятен и их поведении. Несмотря на то, что физическая природа пятен оставалась неясной вплоть до XX века, наблюдения продолжались. В XV и XVI вв. исследования были затруднены по причине их малого количества, что сейчас

рассматривается как продолжительный период низкой СА, называемый минимумом Маундера. К XIX веку уже имелся достаточно продолжительный ряд наблюдений числа пятен, чтобы определить периодические циклы в активности Солнца. В 1845 г. профессора Д.Генри и С.Александр из Принстонского университета наблюдали Солнце с помощью термометра и определили, что пятна излучают меньше радиации по сравнению с окружающими областями Солнца. Позже было определено излучение выше среднего в областях флокул.

Связь изменений СА и климата Земли исследуется начиная с 1900 года. Ч. Г. Аббот из Смитсоновской обсерватории (САО) был занят изучением активности Солнца. Позже, будучи уже главой САО, он учредил солнечную обсерваторию в Калама (Чили) для дополнения наблюдений, которые проводились в Маунт-Вильсон. Результатом этой работы стало определение 27 гармонических периодов СА в пределах цикла Хейла, включая циклы периодом 7, 13 и 39 месяцев. Также прослеживалась связь этих периодов с погодой посредством сопоставления солнечных трендов с температурой и уровнем осадков в городах. С появлением дисциплины дендрохронологии начались попытки установить связь скорости роста деревьев с текущей СА и последующей интерпретацией прежних периодов. Статистические исследования связи погоды и климата с СА были популярны на протяжении столетий, начиная по крайней мере с 1801 года, когда У.Гершель заметил связь между количеством солнечных пятен и ценами на пшеницу. Сейчас эта связь устанавливается с использованием обширных наборов данных, полученных наземными станциями и метеорологическими спутниками, с применением погодных моделей и наблюдений текущей активности Солнца.

Солнечные пятна — это области на поверхности Солнца, которые темнее окружающей их фотосферы, так как в них сильное магнитное поле подавляет конвекцию плазмы и снижает ее температуру примерно на 2000 градусов. Связь общей светимости Солнца с количеством пятен является предметом споров, начиная с первых наблюдений за числом и площадью солнечных пятен в XVII веке. Сейчас известно, что взаимосвязь существует — пятна, как правило, менее чем на 0,3 % уменьшают светимость Солнца и вместе с тем увеличивают светимость менее чем на 0,05 % путем образования факул и яркой сетки, связанной с магнитным полем. Влияние на солнечную светимость магнитно-активных областей не было подтверждено вплоть до первых наблюдений с ИСЗ в 1980-х годах. Орбитальные обсерватории «Нимбус 7», запущенная 25 октября 1978 года, и «Солнечный максимум», запущенная 14 февраля 1980 года, определили, что благодаря ярким областям вокруг пятен, общий эффект заключается в увеличении яркости Солнца вместе с увеличением числа пятен. Согласно данным, полученным с солнечной обсерватории «SOHO», изменение СА соответствует также незначительному, ~0.001 %, изменению диаметра Солнца.



Количество солнечных пятен характеризуется с помощью числа Вольфа, которое известно также как **цюрихское число**. Этот индекс использует комбинированное число пятен и число групп пятен, а так же учитывает различия в наблюдательных приборах. Используя статистику числа солнечных пятен, наблюдения за которыми осуществлялось в течение сотен лет, и наблюдаемые взаимосвязи в последние десятилетия, производятся оценки светимости Солнца за весь исторический период. Также, наземные инструменты калибруются на основании сравнения с наблюдениями на высотных и космических обсерваториях, что позволяет уточнить старые данные. Другие достоверные данные, такие как наличие и количество радиоизотопов, происхождение которых обусловлено космическим излучением (**космогенных**), используются для определения магнитной активности и — с большой вероятностью — для определения *солнечной активности*.

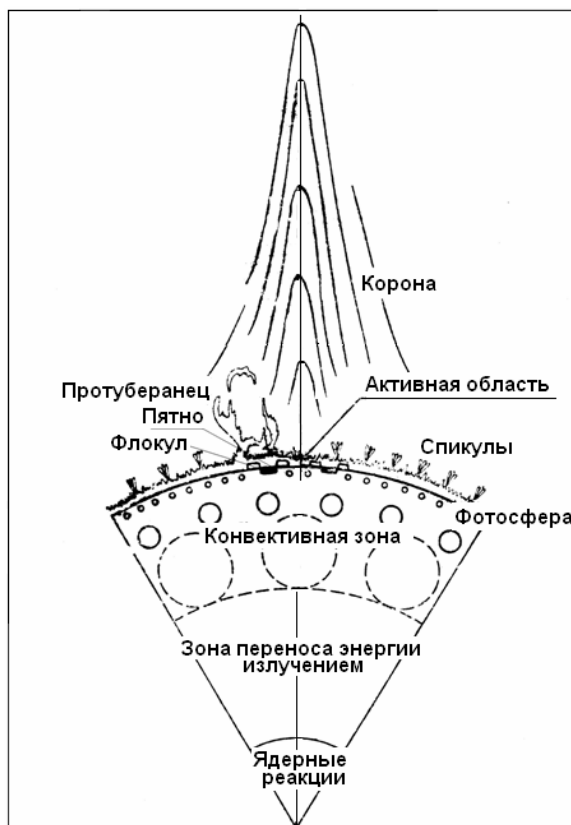


Рис. 2. Активные события в хромосфере Солнца.

Используя данные методики, в 2003 году было установлено, что в течение последних пяти 11-летних циклов количество пятен на Солнце должно было быть максимальным за последние 1 150 лет. Числа Вольфа за последние 11 400 лет определяются путем использования дендрохронологического датирования концентраций радиоуглерода.

Согласно этим исследованиям, уровень СА в течение последних 70-ти лет является исключительным — последний период со схожим уровнем имел место 8 000 лет назад. Солнце имело схожий уровень активности магнитного поля всего ~10 % времени из последних 11 400 лет, причем практически все предыдущие периоды были более короткими по сравнению с современным.

Изменения солнечной активности с приблизительной датировкой:

Название периода	Начало	Завершение
Минимум Оорта (см.Средневековый тёплый период)	1040	1080
Средневековый Максимум (см.Средневековый тёплый период)	1100	1250
Минимум Вольфа	1280	1350
Минимум Шпёрера	1450	1550
Минимум Маундера	1645	1715
Минимум Дальтона (Д. Дальтон)	1790	1820
Современный Максимум	1950	2004
Современный Минимум	2004	(сейчас)

В периоды максимума цикла активные области расположены по всему солнечному диску, их много и они хорошо развиты. Период минимума они располагаются вблизи экватора их не много, и они развиты слабо. Видимым проявлением активных областей являются солнечные пятна, факелы, протуберанцы, волокна, флоккулы и пр. Наиболее известным и изученным является 11 летний цикл, открытый Генрихом Швабе и подтвержденным Робертом Вольфом, который исследовал изменение активности Солнца при помощи предложенного им индекса Вольфа, за два с половиной столетия. Изменение Активности солнца с периодом равным 11,1 года носит название закона Швабе - Вольфа. Также предполагается существование 22, 44 и 55 летних циклов изменения активности. Установлено что величина максимума циклов меняется с периодом около 80 лет. Эти периоды проявляются непосредственно на графике активности солнца. Ученые, изучив кольца на спилах деревьев, ленточные глины, сталактиты, залежам ископаемых, раковины моллюсков и другие признаки, предположили существование и более продолжительных циклов, длительностью около 110, 210, 420 лет. А так же и так называемые вековые продолжительностью и сверхвековые циклы 2400, 35000, 100 000 и, даже, 200 - 300 миллионов лет.

Специалисты отмечают, что на 2008-2009 годы пришелся глубокий минимум солнечной активности. За последние четыре года зарегистрировано всего четыре вспышки М-класса, которые относятся к четвертому классу вспышечной активности по пятибалльной шкале (буквы А, В, С, М и Х). Две вспышки пришлись на финал прошлого, и две – на начало нового – 24-й цикла солнечной активности. Ни одного события самого высокого Х-класса не отмечалось с 14 декабря 2006 года. И вот это случилось! Группа пятен 1158, принеся 13 февраля самое яркое событие за последний год (вспышку М6.6), продолжала увеличиваться в размерах и генерировать пятна. За сутки она выдала 11 событий С-класса, одну короткую, но сильную вспышку М-класса амплитудой 2.2, и в ночь на 15 февраля – самую мощную вспышку 24-го цикла активности (Х2.2). В ночь по МСК отмечалась внезапная магнитная буря, сообщает Институт прикладной геофизики Росгидромета. Таким образом, можно констатировать переход от состояния пробуждения Солнца к уровню стабильно высокой активности.

Солнечные циклы.

Один из ведущих специалистов по солнечно-земной физике профессор университета на Аляске С. Акасофу, подводя итоги 20 века в этой области наук, напомнил, что в 1892 г. Лорд Кельвин писал « .. разработанная Максвеллом электромагнитная теория нашла решение многих проблем... Кажется, мы можем прийти к заключению, что предположение о связи между магнитными бурями и солнечными пятнами нереально ...».

С другой стороны, сравнивая записи солнечной и магнитосферной активности, Маундер (1905) заключил: «источник магнитных бурь, это Солнце». Позже он заметил: «солнечные пятна и магнитные штормы родственны друг другу, когда нет магнитных возмущений, значит, не было пятен». Акасофу отмечает, что, несмотря на весь мировой опыт исследований солнечно-земных связей, неясными остаются такие проблемы, как: природа солнечного ветра, природа солнечной короны, причина появления солнечных транзиентов и т.д. Фактически он перечисляет все основные проблемы этой области физики. Отсюда следует, что основные моменты солнечно-земных связей изучены ещё недостаточно для понимания проблемы.

В этой же заметке Акасофу приводит Солнечные циклы с 18-го по 23-ий, – современный (рис. 3), и сравнивает современный цикл с предыдущими - 22-ым и 17-ым. Рисунок 3 можно принять за основу при составлении прогноза циклов на несколько следующих лет. Видно, что максимум солнечной активности должен прийти примерно на начало 2001 года, после чего должно наступить её уменьшение.

Солнечный цикл – периодический процесс появления и развития на Солнце активных областей – пятен, мест выхода на поверхность сильных магнитных полей. Этот процесс затрагивает весь диск Солнца и все уровни его атмосферы. Сильнее всего солнечная активность проявляется в широтной зоне $\pm 30^\circ$. Центры активности появляются в начале цикла на широтах около 30° , а затем зона, занятая ими, постепенно смещается к более низким широтам, т.е. в сторону солнечного экватора. Активные области часто объединяются в комплексы, которые существуют в течение нескольких лет. Это явление впервые было обнаружено Маундером и получило название «бабочек» Маундера (рис. 4).

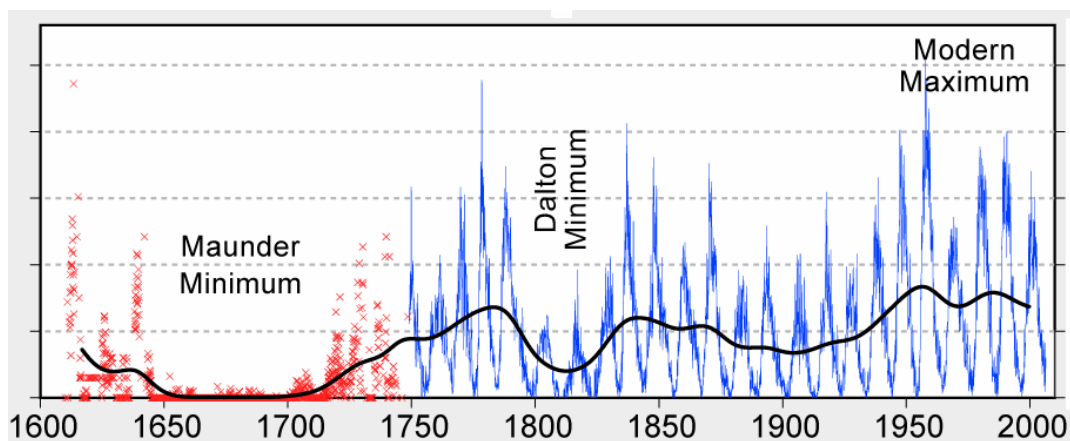


Рис. 3. Циклы солнечной активности.

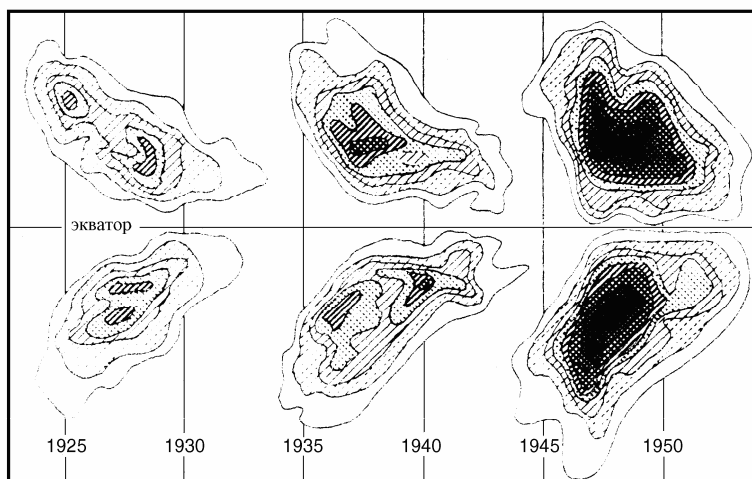


Рис. 4. Пространственное и временное распределение солнечных пятен по диску Солнца - «бабочки» Маундера.

Солнечные циклы обозначаются либо числами Вольфа – относительным числом и площадью солнечных пятен, либо интенсивностью потока радиоизлучения Солнца на волне 10.7 см, или рентгеновского излучения, в диапазоне 2 - 8 ангстрем \AA ($1\text{\AA} = 10^{-8}$ см). Солнечные циклы отождествляют с изменением солнечной активности с периодом ≈ 11.2 года. При этом происходит смена полярности магнитного поля Солнца. Возврат к одной и той же картине магнитного поля происходит примерно через 22 года. Этот цикл принято называть магнитным циклом. Следует обратить внимание на то, что авторы работ по солнечно-земной физике, при обсуждении природы и степени влияния солнечных циклов, всегда упоминают только о пятнах, радиоизлучении и ультрафиолете, и никогда не говорят об их 11-летней цикличности. Хотя принято считать, что самые сильные вспышки происходят в годы наибольшей солнечной активности.

ВСПЫШКИ НА СОЛНЦЕ (Солнечные вспышки – СВ) представляют собой самое мощное из всех проявлений солнечной активности. Энергия большой солнечной вспышки достигает 10^{32} эрг, что приблизительно в 100 раз превышает тепловую энергию, которую можно было бы получить при сжигании всех разведанных на Земле запасов нефти и угля. Эта гигантская энергия выделяется на Солнце в течение нескольких минут, и соответствует средней за этот период мощности $\sim 10^{29}$ эрг/с. В отдельные моменты времени, в частности, во время взрывной, или импульсной, фазы развития, мощность может быть ещё в несколько раз больше. Однако, как легко заметить, мощность вспышки не превышает сотых долей процента от мощности полного излучения Солнца $\sim 4 \cdot 10^{33}$ эрг/с. Поэтому, при вспышке не происходит заметного увеличения светимости Солнца. Лишь самые большие вспышки на Солнце можно заметить в белом свете (оптическом континууме). Обычно СВ наблюдаются как значит. увеличения яркости участков поверхности Солнца в свете хромосферных линий, в частности в линии водорода H_{α} . Как следствие этого факта, на протяжении многих лет широко использовался термин "хромосферная вспышка", который, однако, не соответствует сущности этого интереснейшего явления в атмосфере Солнца.

Характерная особенность СВ состоит в том, что основная часть её энергии выделяется в виде кинетической энергии выбросов вещества, движущихся в короне и межпланетном пространстве со скоростями до 1000 км/с, энергии жёсткого электромагнитного излучения и потоков ускоренных до гигантских энергий (иногда десятки ГэВ) частиц. Радиоизлучение вспышки, в отличие от излучения спокойного Солнца, также свидетельствует о наличии ускоренных частиц и о нетепловом характере главного вспышечного процесса или, как часто говорят, механизма вспышки.

Солнечная вспышка — взрывной процесс выделения энергии (световой, тепловой и кинетической) в атмосфере Солнца. Вспышки так или иначе охватывают все слои солнечной атмосферы: фотосферу, хромосферу и корону Солнца. Необходимо отметить, что солнечные вспышки и корональные выбросы массы являются различными и независимыми явлениями солнечной активности.

Продолжительность импульсной фазы солнечных вспышек обычно не превышает нескольких минут, а количество энергии, высвобождаемой за это время, может достигать миллиарды мегатонн в тротиловом эквиваленте. Энергию вспышки традиционно определяют в видимом диапазоне электромагнитных волн по произведению площади свечения в линии излучения водорода H_{α} , характеризующей нагрев нижней хромосферы, на яркость этого свечения, связанную с мощностью источника.

В последние годы часто используют также классификацию, основанную на патрульных однородных измерениях на серии ИСЗ, главным образом GOES, амплитуды теплового рентгеновского всплеска в диапазоне энергий 0,5-10 кэВ (с длиной волны 0,5—8 ангстрем). Классификация была предложена в 1970 году Д.Бейкером и первоначально основывалась на измерениях спутников «Solrad». По этой классификации солнечной вспышке присваивается балл — обозначение из латинской буквы и индекса за ней. Буквой может быть А, В, С, М или Х в зависимости от величины достигнутого вспышкой пика интенсивности рентгеновского излучения.

Буква	Интенсивность в пике (Вт/м ²)
А	меньше 10^{-7}
В	от $1,0 \times 10^{-7}$ до 10^{-6}
С	от $1,0 \times 10^{-6}$ до 10^{-5}
М	от $1,0 \times 10^{-5}$ до 10^{-4}
Х	больше 10^{-4}

Индекс уточняет значение интенсивности вспышки и может быть от 1,0 до 9,9 для букв А, В, С, М и более — для буквы Х. Так, например, вспышка 12 февраля 2010 года балла М8.3 соответствует пиковой интенсивности $8,3 \times 10^{-5}$ Вт/м². Самой мощной (по состоянию на 2010 год) зарегистрированной с 1976 года вспышке, произошедшей 4 ноября 2003 года, был присвоен балл Х28, таким образом, интенсивность ее рентгеновского излучения в пике составляла 28×10^{-4} Вт/м². Следует заметить, что регистрация рентгеновского излучения Солнца, так как оно полностью поглощается атмосферой Земли, стала возможной начиная с первого запуска космического аппарата «Спутник-2» с соответствующей аппаратурой, поэтому данные об интенсивности рентгеновского излучения солнечных вспышек до 1957 года полностью отсутствуют.

Измерения в разных диапазонах длин волн отражают разные процессы во вспышках. Поэтому корреляция между двумя индексами вспышечной активности существует только в статистическом смысле, так для отдельных событий один индекс может быть высоким, а второй низким и наоборот.

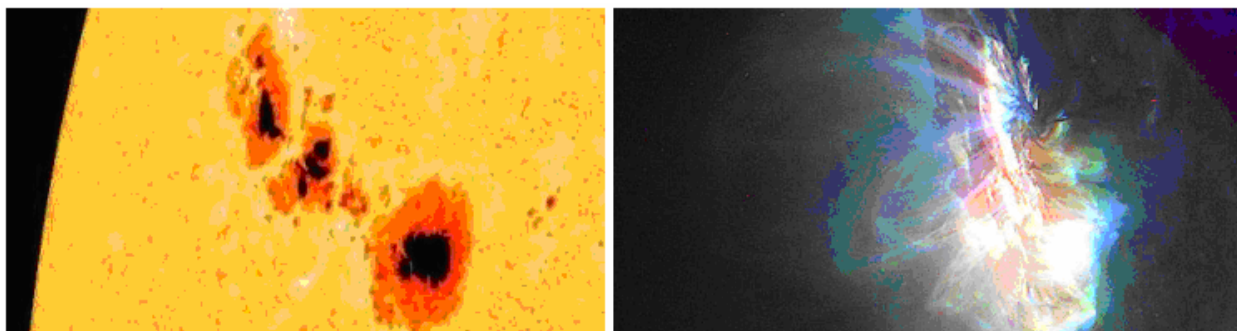
Солнечные вспышки, как правило, происходят в местах взаимодействия солнечных пятен противоположной магнитной полярности или, более точно, вблизи нейтральной линии магнитного поля, разделяющей области северной и южной полярности. Частота и мощность солнечных вспышек зависят от фазы солнечного цикла. Солнечные вспышки имеют прикладное значение, например, при исследовании элементного состава поверхности небесного тела с разреженной атмосферой или при её отсутствии, выступая в роли возбудителя рентгеновского излучения для рентгенофлуоресцентных спектрометров, установленных на борту космических аппаратов.

Излучение СВ наблюдается в широком диапазоне - от километровых радиоволн до жёстких гамма-лучей - с помощью наземных, спутниковых и межпланетных станций. Одновременно осуществляется непосредственное детектирование ускоренных во вспышках электронов, протонов, ядер более тяжёлых элементов и выбрасываемой в межпланетное пространство плазмы, а также вторичных ионосферных и геомагнитных эффектов.

Характерные значения полной энергии \mathcal{E} (эрг) и мощности F (эрг·с⁻¹), выделяемых в различных каналах для больших и малых солнечных вспышек

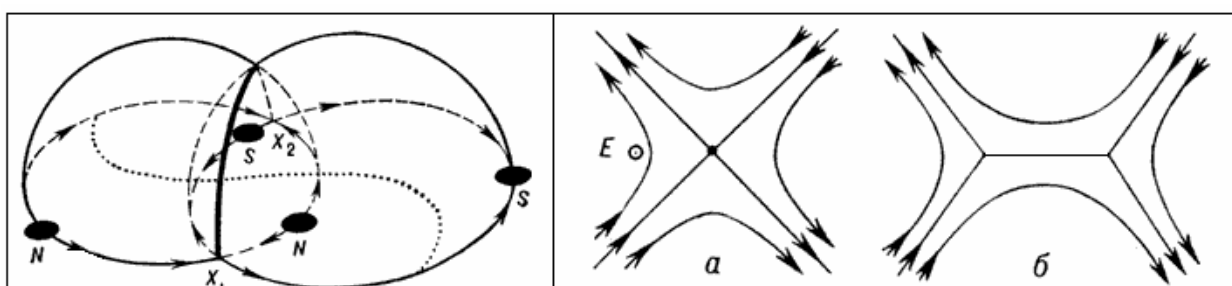
	Самые большие вспышки		Субвспышка	
	\mathcal{E}	F	\mathcal{E}	F
Излучение				
мягкое рентгеновское и ультрафиолетовое	$(3-5) \cdot 10^{31}$	$(3-5) \cdot 10^{28}$	$(1-3) \cdot 10^{29}$	$(1-3) \cdot 10^{27}$
оптически непрерывное	$(1-3) \cdot 10^{31}$	$(1-3) \cdot 10^{28}$	(?)	(?)
в линии H_{α}	$(1-3) \cdot 10^{30}$	$(1-3) \cdot 10^{27}$	10^{26}	$3 \cdot 10^{23}$
жесткоё рентгеновское	$(3-5) \cdot 10^{26}$	$(3-5) \cdot 10^{23}$	$(1-3) \cdot 10^{24*}$	$(1-3) \cdot 10^{22}$
гамма-	$(1-3) \cdot 10^{25}$	$(1-3) \cdot 10^{22}$	(?)	(?)
радио-	$\sim 10^{24}$	$\sim 10^{21}$	10^{22}	10^{20}
Ускоренные частицы:				
электроны (\blacklozenge 20 кэВ)	$(3-5) \cdot 10^{31}$	$(3-5) \cdot 10^{28}$	10^{27*}	10^{25}
Протоны (\blacklozenge 20 МэВ)	$(1-3) \cdot 10^{31}$	$(1-3) \cdot 10^{28}$	(?)	(?)
Гидродинамические движения плазмы				
межпланетные выбросы и ударные волны	$(1-3) \cdot 10^{32}$	-	-	-
движения над хромосферой	10^{32}	10^{29}	10^{29}	10^{26}
* Для подавляющего большинства субвспышек отсутствует				

Исследование СВ. имеет и прямое практическое значение. Известно, что СВ оказывают сильное воздействие на ионосферу, вызывая нарушения радиосвязи, работы радионавигационных устройств и т. д. Вспышки существенно влияют на состояние околоземного космического пространства. В связи с пилотируемыми космическими полётами возникла серьёзная задача защиты космонавтов от ионизирующего излучения вспышек и заблаговременного прогнозирования возможной радиационной опасности. Наконец, имеются свидетельства сильного влияния вспышечной активности на погоду и состояние биосферы Земли.



На протяжении многих десятилетий наблюдения СВ велись только в видимом диапазоне электромагнитного излучения, главным образом в линии H_{α} . Накопленный за это время огромный материал позволил установить закономерности развития вспышки в хромосфере и, что особенно важно для понимания механизма вспышки, её тесную связь с

магнитными полями на поверхности Солнца. Обычно большая вспышка наблюдается как увеличение яркости хромосферы, которое охватывает большую площадь (иногда до 10^{-3} площади видимой полусферы Солнца) в виде двух вспышечных лент (рис. 1). Как правило, эти ленты расположены в областях магнитных полей противоположной полярности на фотосфере. Уже первые внеатмосферные наблюдения на ракетах и спутниках показали, что В. на С., если иметь в виду её главный процесс, представляют собой специфически корональное, а не хромосферное явление. Это следует уже из относительно сильного рентгеновского и УФ-излучения вспышки (см. табл.). Оптическое излучение СВ, скорее всего, возникает как вторичный эффект вдали от сердцевины вспышки, точнее говоря, в основаниях петель, дающих рентгеновское и УФ-излучение. Петли образуют своеобразные аркады и, по-видимому, является наиболее заметной наблюдаемой частью источника энергии вспышки. Т. о., H_{α} -излучение, которое было исторически выбрано в качестве первоначального признака и положено в основу классификации В. на С., представляет собой лишь побочное явление.



Модель магнитного поля четырёх пятен попарно противоположной полярности. Магнитные потоки разделены поверхностью, состоящей из двух куполов. Предельная силовая линия является общей для этих потоков (жирная линия). Она спускается к фотосфере в нулевых точках X_1 и X_2 . Пунктир - нейтральная линия (слева).

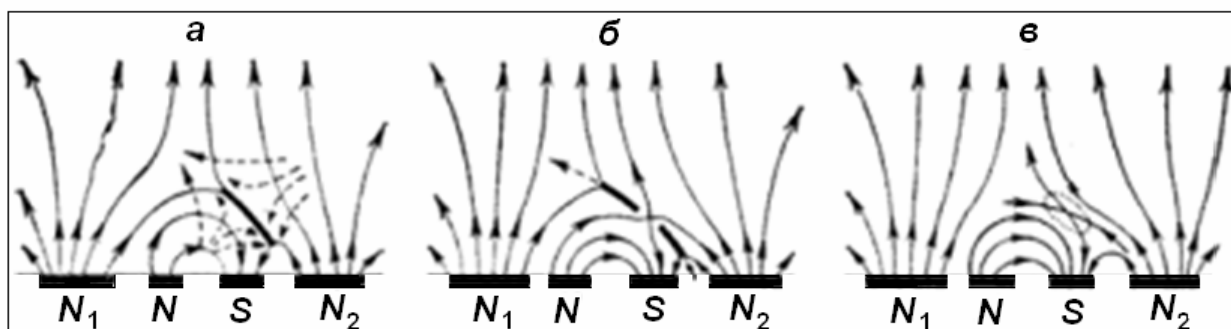
Формирование токового слоя на нулевой линии магнитного поля: а - силовые линии магнитного поля в окрестности нулевой линии X-типа, которая перпендикулярна плоскости рисунка; Е – электрическое поле, направленное вдоль нулевой линии; б – токовый слой (жирная линия), образующийся на нулевой линии (справа).

Современные наблюдения и базирующиеся на них теоретические модели свидетельствуют в пользу предположения, что главный вспышечный процесс обусловлен накоплением и последующим быстрым выделением свободной магнитной энергии в верхней хромосфере и нижней короне. Под свободной здесь понимается магнитная энергия, избыточная по сравнению с энергией потенциального (магнитное поле потенциально вне области, занятой его источниками) магнитного поля, имеющего те же источники (солнечные пятна, фоновые магнитные поля) в фотосфере. Иными словами, свободная энергия активной области связана с токами, текущими в атмосфере Солнца над уровнем фотосферы (это есть энергия взаимодействия токов с магнитным полем), а процесс вспышки есть процесс быстрого изменения этих токов. Возникновение избытка магнитной энергии (и порождающих его токов над фотосферой) может осуществляться различными путями.

Возможен, например, - такой: Медленные движения источников (токов) под фотосферой непрерывно изменяют потенциальное магнитное поле в атмосфере Солнца. В некоторый момент оно может стать достаточно сложным - в нём может появиться т. н. предельная силовая линия. Она является общей для нескольких независимых магнитных потоков (рис.). Через предельную линию происходит перераспределение магнитных потоков, которое необходимо для того, чтобы магнитное поле имело наименьшую

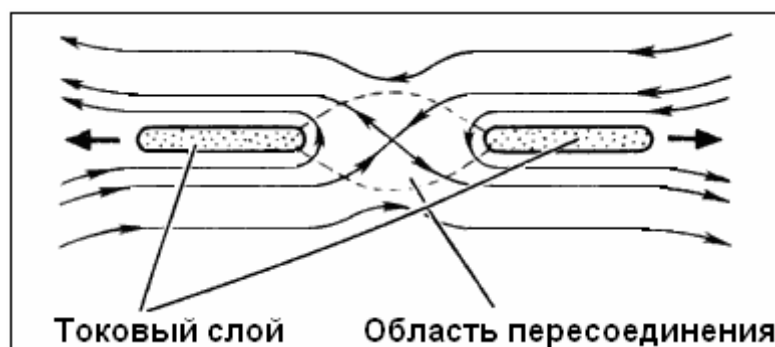
энергию, т. е. оставалось потенциальным при изменении его источников на фотосфере. Однако с момента появления такой линии электрическое поле, индуцируемое изменениями магнитного поля, вызывает вдоль неё ток. Последний из-за взаимодействия с магнитным полем принимает форму токового слоя (рис.). В условиях высокой проводимости солнечной плазмы токовый слой препятствует перераспределению магнитных потоков. В результате в верхней хромосфере и короне происходит накопление энергии в виде магнитной энергии токового слоя.

Трёх стадиям развития токового слоя в рамках модели, предложенной советским астрофизиком С. И. Сыроватским, можно поставить в соответствие три фазы В. на С.: начальную, взрывную и горячую.



Стадии развития токового слоя (жирная линия) в атмосфере Солнца. Сплошные линии - магнитное поле полюсов N, N₁, N₂, S, штриховые - движение плазмы с вмороженным магнитным полем: а - квазистационарный предвспышечный токовый слой с кулоновской проводимостью; б - быстрая перестройка (разрыв) токового слоя - взрывная фаза вспышки; в - квазистационарное магнитное пересоединение в области аномального сопротивления - горячая фаза вспышки.

Начальная фаза - сравнительно длительная (часы или даже десятки часов) стадия возникновения и формирования (расширения) токового слоя. На этой стадии, по-видимому, преобладает джоулев нагрев плазмы током в слое. В принципе, на этой стадии возможно установление квазистационарного режима, когда ширина слоя увеличивается настолько, что скорость диссипации магн. поля в нём останавливает дальнейший рост магн. энергии, а джоулев нагрев плазмы в слое оказывается уравновешенным; потерями энергии на излучение (рис. 4,а). Через нек-рое время из-за действия ряда неустойчивостей такой баланс энергии нарушается, и начинается существенно нестационарная стадия развития токового слоя.



Действие магнитного поля на токовый слой в области аномального сопротивления. Силовые линии магнитного поля, проникая внутрь слоя, приобретают форму петель,

которые, подобно упругим нитям, стремятся разорвать токовый слой. Жирные стрелки - направления выброса плазмы.

Взрывная фаза представляет наибольший интерес, поскольку за короткое время (секунды - десятки секунд) при разрыве токового слоя выделяется огромная энергия, запасённая в его магнитном поле. Эта энергия выделяется в виде энергии гидродинамических течений (разрыв слоя сопровождается быстрыми движениями плазмы), мощных потоков тепла из области разрыва токового слоя и в виде энергии ускоренных частиц. Причиной разрыва токового слоя является, возможно, тепловая неустойчивость, которая приводит к цепочке кинетических явлений: быстрому нагреву электронов плазмы, возбуждению той или иной плазменной неустойчивости и переходу слоя в турбулентное состояние. При этом резко увеличивается электрическое сопротивление токового слоя. Появление в некоторой части токового слоя области высокого или аномального сопротивления приводит к быстрой диссипации тока и, соответственно, - к проникновению магнитного поля через токовый слой. Последнее явление сопровождается пересоединением силовых линий магнитного поля, в силу чего оно получило название - магнитное пересоединение. Возникает сильное магнитное поле поперёк токового слоя, которое создаёт магнитную силу, стремящуюся разорвать токовый слой. Под действием этой силы плазма выбрасывается из области слоя с большой скоростью.

Горячая фаза вспышки соответствует стадии существования высокотемпературной корональной области магнитного пересоединения. Здесь главным каналом выделения энергии является джоулев нагрев плазмы с аномальным сопротивлением. В охлаждении такого высокотемпературного турбулентного токового слоя играют важную роль насыщенные тепловые потоки.

Итак, источник энергии вспышки - токовый слой - расположен на предельной силовой линии магнитного поля в короне. Потоки тепла и ускоренных частиц распространяются вдоль магнитных силовых линий и вызывают нагрев хромосферы по разные стороны от нейтральной линии фотосферного магнитного поля. Так образуются вспышечные "ленты", наблюдаемые в $H\alpha$ и др. хромосферных линиях. Сама нейтральная линия фотосферного поля остаётся тёмной, т. к. потоки энергии к ней не поступают. Это обусловлено тем, что она почти всегда не связана силовыми линиями с токовым слоем. Наличие нескольких каналов освобождения энергии в токовом слое - теплота, излучение, гидродинамические течения плазмы, ускоренные частицы - определяет большое многообразие физ. процессов, вызываемых СВ в атмосфере Солнца, например, тепловые и ударные волны, радио- и жёсткое рентгеновское излучение ускоренных электронов, ядерные реакции и порождаемое ими γ -излучение. Разным процессам выделения энергии соответствуют различные характерные времена и мощности, что наряду с др. факторами (пространственная неоднородность токового слоя, неодновременность эволюции различных его частей, конфигурация реального магнитного поля и т. д.) приводит к сложной картине В. на С. и их богатому разнообразию.

Корональный выброс массы. Наблюдение корональных выбросов массы Солнца с поверхности Земли - затруднено. По-видимому, первое наблюдение корональных выбросов в видимом диапазоне длин волн было выполнено в начале 1970-х годов с помощью коронографа, установленного на седьмой орбитальной солнечной обсерватории (OSO-7). Так как затмевающий диск коронографа вырезает из поля зрения прибора яркий диск Солнца, то наблюдения источника коронального выброса на поверхности Солнца с помощью коронографа оказываются невозможным, и предположения о возможном его источнике делаются на основе наблюдений другими приборами в других диапазонах волн. Эта принципиальная трудность приводит к тому, что по наблюдениям со спутника вблизи

Земли, в ряде случаев оказывается невозможным определить направление движения выброса: движется ли он к Земле или от Земли. Для преодоления этой трудности в настоящее время используется пара космических аппаратов проекта STEREO, которые разведены на большие углы по орбите Земли.

В отличие от СВ, во время которых магнитная энергия, накопленная в активных областях на Солнце, реализуется в основном в виде электромагнитного излучения, во время корональных выбросов массы эта энергия расходуется на ускорение огромных масс вещества. Солнечные вспышки и корональные выбросы являются независимыми процессами. Выброс включает в себя плазму, состоящую в основном из электронов и протонов наряду с небольшим количеством более тяжёлых элементов - гелия, кислорода, железа и других. Некоторые ионы часто имеют более низкие состояния ионизации (например, однократно ионизованные атомы гелия), чем окружающая спокойная плазма короны, что указывает на то, что значительная часть массы выброса может быть ускорена из областей с более низкой температурой, т. е. с уровня хромосферы. Характерной особенностью выброса является то, что общая топология выброса имеет форму гигантской петли, оба или одно основание которой закреплены за солнечную атмосферу, а магнитное поле в выбросе, как правило, выше, чем в спокойном солнечном ветре, и представляет собой скрученные в жгут магнитные силовые линии.

В межпланетном пространстве выбросы, как правило, обозначают английской аббревиатурой ICME (Interplanetary Coronal Mass Ejection), одной из разновидностей такого ICME является магнитное облако. Когда выброс достигает Земли, он может оказать сильное влияние на её магнитосферу, вызывая различные эффекты космической погоды. Среди возможных эффектов - полярные сияния, магнитные бури, нарушения в работе электрооборудования, ухудшение условий распространения радиоволн.

Солнечная радиация - электромагнитное и корпускулярное излучение Солнца. Солнечная радиация измеряется по её тепловому действию (калории на единицу поверхности за единицу времени) и интенсивности (ватты на единицу поверхности). В целом, Земля получает от Солнца менее $0,5 \times 10^{-9}$ от его излучения. Электромагнитная составляющая солнечной радиации распространяется со скоростью света и проникает в земную атмосферу. До земной поверхности солнечная радиация доходит в виде прямой и рассеянной радиации. Всего Земля получает от Солнца менее одной двухмиллиардной его излучения. Спектральный диапазон электромагнитного излучения Солнца очень широк — от радиоволн до рентгеновских лучей — однако максимум его интенсивности приходится на видимую (жёлто-зелёную) часть спектра.

Существует также корпускулярная часть солнечной радиации, состоящая преимущественно из протонов, движущихся от Солнца со скоростями 300—1500 км/с. Во время солнечных вспышек образуются также частицы больших энергий (в основном протоны и электроны), образующие солнечную компоненту космических лучей.

Энергетический вклад корпускулярной составляющей солнечной радиации в её общую интенсивность невелик по сравнению с электромагнитной. Поэтому в ряде приложений термин «солнечная радиация» используют в узком смысле, имея в виду только её электромагнитную часть.

Солнечная радиация — главный источник энергии для всех физико-географических процессов, происходящих на земной поверхности и в атмосфере. Количество солнечной радиации зависит от высоты солнца, времени года, прозрачности атмосферы. Для измерения солнечной радиации служат актинометры и пиргелиометры. Интенсивность солнечной радиации обычно измеряется по её тепловому действию и выражается в калориях на единицу поверхности за единицу времени.

Средняя дневная сумма солнечной радиации, кВтч/м ²											
Архангельск	Якутск	Санкт-Петербург	Москва	Новосибирск	Берлин	Улан-Удэ	Лондон	Хабаровск	Ростов-на-Дону	Сочи	Находка
2,29	2,96	2,60	2,72	2,91	2,74	3,47	2,73	3,69	3,45	4,00	3,99

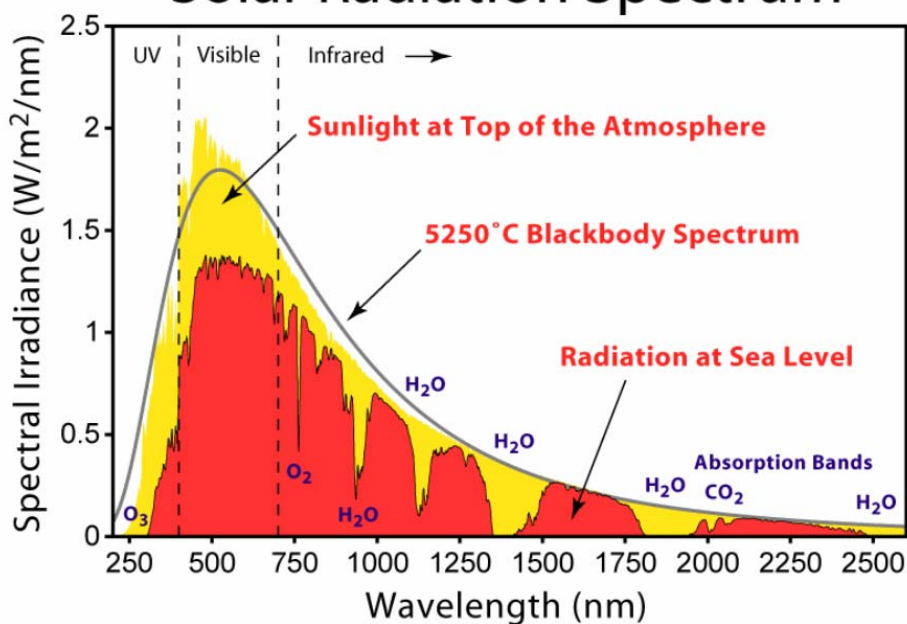
Средняя дневная сумма солнечной радиации в декабре, кВтч/м ²											
Архангельск	Якутск	Санкт-Петербург	Москва	Новосибирск	Берлин	Улан-Удэ	Лондон	Хабаровск	Ростов-на-Дону	Сочи	Находка
0,05	0,16	0,17	0,33	0,62	0,61	0,97	0,60	1,29	1,00	1,25	2,04

Средняя дневная сумма солнечной радиации в июне, кВтч/м ²											
Архангельск	Якутск	Санкт-Петербург	Москва	Новосибирск	Берлин	Улан-Удэ	Лондон	Хабаровск	Ростов-на-Дону	Сочи	Находка
5,51	6,19	5,78	5,56	5,48	4,80	5,72	4,84	5,94	5,76	6,75	5,12

Солнечная радиация сильно влияет на Землю только в дневное время, безусловно - когда Солнце находится над горизонтом. Также солнечная радиация очень сильна вблизи полюсов, в период полярных дней, когда Солнце даже в полночь находится над горизонтом. Однако зимой в тех же местах Солнце вообще не поднимается над горизонтом, и поэтому не влияет на регион. Солнечная радиация не блокируется облаками, и поэтому всё равно поступает на Землю (при непосредственном нахождении Солнца над горизонтом). Солнечная радиация - это сочетание ярко-жёлтого цвета Солнца и тепла, тепло проходит и сквозь облака. Солнечная радиация передаётся на Землю посредством излучения, а не методом теплопроводности.

Сумма радиации, полученной небесным телом, зависит от расстояния между планетой и звездой - при увеличении расстояния вдвое количество радиации, поступающее от звезды на планету уменьшается вчетверо (пропорционально квадрату расстояния между планетой и звездой). Таким образом, даже небольшие изменения расстояния между планетой и звездой (зависит от эксцентриситета орбиты) приводят к значительному изменению количества поступающей на планету радиации. Эксцентриситет земной орбиты тоже не является постоянным - с течением тысячелетий он меняется, периодически образуя то практически идеальный круг, иногда же эксцентриситет достигает 5% (в настоящее время он равен 1,67%), то есть в перигелии Земля получает в настоящее время в 1,033 больше солнечной радиации, чем в афелии, а при наибольшем эксцентриситете - более чем в 1,1 раза. Однако гораздо более сильно количество поступающей солнечной радиации зависит от смен времён года - в настоящее время общее количество солнечной радиации, поступающее на Землю, остаётся практически неизменным, но на широтах 65 С.Ш. (широта северных городов России и Канады) летом количество поступающей солнечной радиации более чем на 25% больше, чем зимой. Это происходит из-за того, что Земля по отношению к Солнцу наклонена под углом 23,3 градуса. Зимние и летние изменения взаимно компенсируются, но, тем не менее, по росту широты места наблюдения всё больше становится разрыв между зимой и летом, так, на экваторе разницы между зимой и летом нет. За Полярным кругом же летом поступление солнечной радиации очень высоко, а зимой очень мало. Это формирует климат на Земле. Кроме того, периодические изменения эксцентриситета орбиты Земли могут приводить к возникновению различных геологических эпох: к примеру, ледникового периода.

Solar Radiation Spectrum

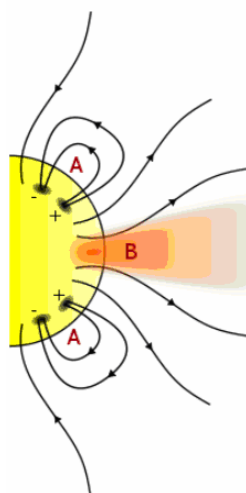


Спектр излучения энергии различными телами и на поверхности Солнца

Корональные дыры (англ. *coronal holes*) — области в солнечной короне, где понижены плотность и температура плазмы. Как правило, плотность в таких районах примерно в сто раз меньше, чем в остальных областях короны. Появление корональных дыр фиксируется с помощью изображений, полученных в рентгеновском диапазоне со спутников.

Появление корональных дыр связывают с периодом ремиссии — временем минимальной солнечной активности. Корональные дыры являются важным элементом солнечно-земной физики, приводя к различным эффектам космической погоды, в частности к геомагнитной активности. Зачастую корональные дыры являются основным фактором, влияющим на ионосферу и магнитное поле Земли. Расположены они обычно в полярных районах Солнца, однако в период максимума могут наблюдаться на всех широтах.

Как правило, линии магнитного поля в экваториальной области Солнца замкнуты, и тем самым предотвращают свободное истечение плазмы в межпланетное пространство. Однако возможна ситуация, когда в результате различных взаимодействий между разными пучками магнитных линий происходит их размыкание. В этом случае плазма перестаёт удерживаться в околосолнечных областях и устремляется прочь от Солнца. В этой области падает её плотность и температура — образуется корональная дыра. "Освободившаяся" плазма становится частью солнечного ветра.



Корональные дыры

В области А плазма удерживается в короне замкнутым магнитным полем. В области В магнитные линии разомкнуты и плазма, перемещаясь вдоль них, беспрепятственно покидает солнечное пространство, образуя корональную дыру.

Солнечными факелами называют яркие поля, окружающие солнечные пятна. По сути дела, факелы представляют собой более яркие по сравнению с общим фоном образования, которые могут занимать большую часть видимой поверхности Солнца.

Структура факелов достаточно сложная. Она состоит из большого количества прожилок, ярких узелков, точек, иными словами факельных гранул, величина каждой из которых составляет до 30000 км. **Факелы — светлые области на поверхности Солнца**

Образование факелов. Солнечные факелы образуются в активных областях магнитного поля Солнца. Как и всё в природе, факелы не появляются просто так. Их возникновение обусловлено одним из свойств магнитного поля, а именно: магнитное поле препятствует движению вещества в том случае, когда оно происходит поперек силовых линий. Если энергия магнитного поля велика, то возможно движение вещества исключительно вдоль силовых линий. В противном случае, слабое магнитное поле в факельной области не способно остановить достаточно мощных конвективных движений, хотя и может придать им более упорядоченный характер. Стоит отметить, что беспорядочные движения происходят как в вертикальной плоскости (в большей мере), так и в горизонтальной. Последние приводят к появлению трения между отдельными частями конвекции, а затем тормозятся магнитным полем, напряжённость которого в области факела гораздо меньше, чем в других областях. Это позволяет газам подниматься выше и переносить гораздо больший поток энергии. Таким образом, факелы появляются при усилении конвекции, которое вызвано слабым магнитным полем.

Особенности факелов. Ближе к центру факелы практически не видны, зато на лимбе солнечного диска они очень заметны. Эта особенность указывает на то, что на некотором уровне в фотосфере температура факелов отличается от температуры соседних факелов, расположенных в других областях, на 200 – 300 К. По сравнению же с температурой окружающей среды, температура факелов больше примерно на 2000 К. Как правило, факелы объединяются в факельные поля. Нередко встречаются факельные поля, в которых не появляются пятна. Таким образом можно сделать вывод, что в факелах не обязательно должны быть солнечные пятна. Продолжительность жизни солнечного факела составляет 3-4 месяца. Также, как и количество пятен, количество факелов влияет на такую характеристику, как солнечная активность.

Спи́кула - основной элемент тонкой структуры хромосферы Солнца. Если наблюдать лимб Солнца в свете определённой и строго постоянной частоты, то спикеры будут видны как столбики светящегося газа, достаточно тонкие в солнечных масштабах (диаметром около 1000 км). Эти столбики сначала поднимаются из нижней хромосферы на 5000-10000 км, а потом падают обратно, где они и затухают. Всё это происходит со скоростью около 20000 м/с. Спикула живёт 5-10 мин. Количество спикеров, существующих на Солнце одновременно, составляет около миллиона. Практически все из них находятся на границах супергранул, то есть именно из спикеров состоит хромосферная сетка.