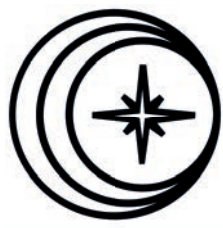


АССОЦИАЦИЯ ПЛАНЕТАРИЕВ



ПРИ ПОДДЕРЖКЕ
**ФОНДА
ПРЕЗИДЕНТСКИХ
ГРАНТОВ**

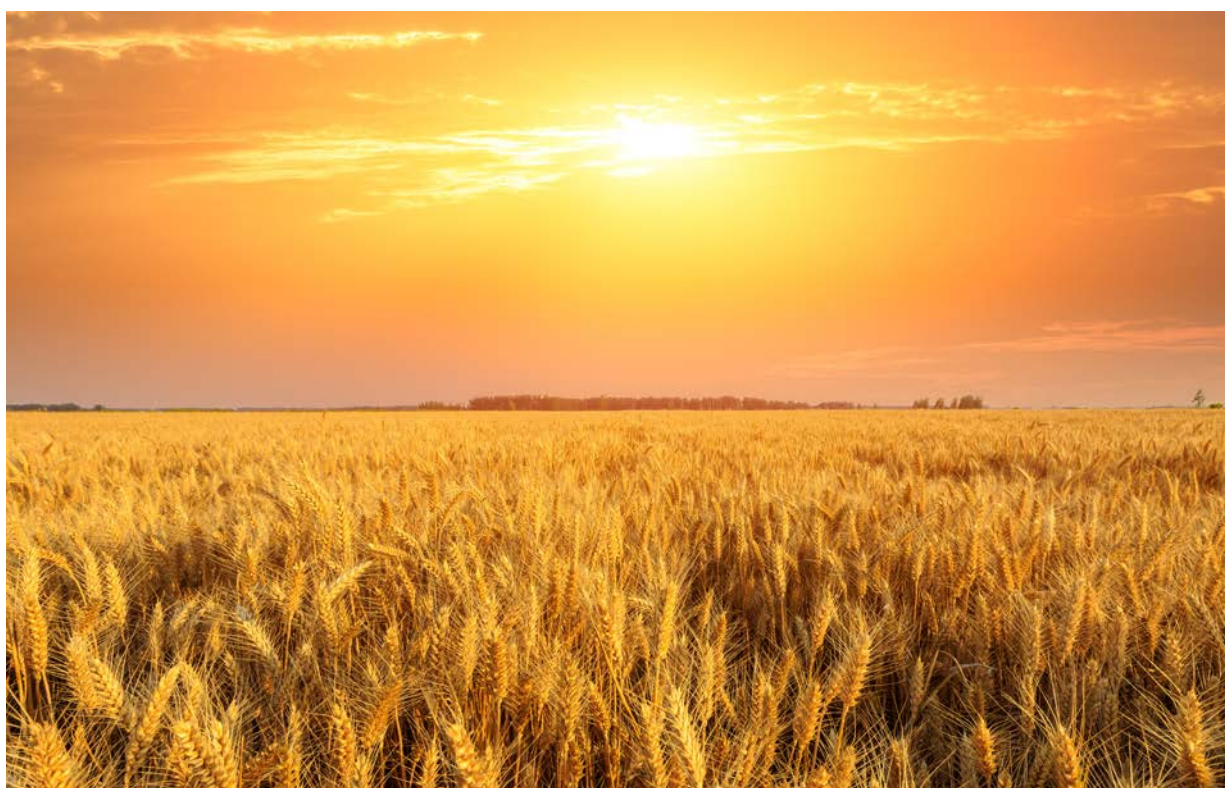
ПРЕДСТАВЛЯЕТ

ИННОВАЦИОННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
МУЛЬТИМЕДИА ПОСОБИЕ
С МЕТОДИЧЕСКИМИ РЕКОМЕНДАЦИЯМИ
"СОЛНЦЕ И ЖИЗНЬ ЗЕМЛИ"

ЗАЯВКА №: 20-2-022239

Москва
2021

Методическое пособие (рекомендации) к инновационному образовательному мультимедиа пособию "Солнце и жизнь Земли"



Зачем нужна эта программа?

Учебная (полнокупольная и планарная) программа «Солнце жизнь Земли» создана Ассоциацией планетариев и лиц, содействующих их развитию при поддержке Фонда президентских грантов в 2021 г. Как известно, в 2017 г. приказом министра образования и науки РФ были внесены изменения в федеральный компонент государственных образовательных стандартов начального общего, основного общего и среднего

(полного) общего образования. В соответствии с этими изменениями, в российской школе был восстановлен отдельный учебный предмет «астрономия», утверждено его содержание.

В концепции преподавания учебного предмета «Астрономия» в образовательных организациях Российской Федерации, реализующих основные общеобразовательные программы, утвержденной коллегией министерства просвещения РФ (протокол от 3 декабря 2019 г, № ПК-4вн) сказано: «должна быть обеспечена государственная поддержка развертыванию всероссийской сети планетариев для организаций общего образования, подготовка специалистов, создание полнокупольного контента для планетариев и систем визуальной реальности, создание учебных, научно-популярных и художественных фильмов по астрономии и космонавтике, отражающих (помимо прочего) отечественный вклад в мировую науку».

Исходя из этих положений, творческий коллектив из Москвы, Иркутска, Калуги, Санкт-Петербурга, Уфы и Ярославля создал учебную программу «Солнце и жизнь Земли» в полнокупольном и планарном вариантах. Ее содержание соответствует разделу учебного стандарта, посвященному Солнцу.

Программа носит учебный характер и может быть использована для изучения курса «Астрономия» школьниками 10 и 11 классов. Ряд положений, изложенных в учебнике, визуализирован в программе, что позволяет воспринять, усвоить и запомнить предлагаемый материал. В то же время, программа может использоваться для системы дополнительного образования (астрономических кружков), а также для популяризации астрономических знаний как научно-популярный фильм.

Согласно планам творческого коллектива, должна быть подготовлена серия учебных полнокупольных и планарных программ, которыми предполагается «покрыть» все основные темы школьного курса астрономии (звезды, Солнце и его влияние на Землю, Солнечная система, малые тела Солнечной системы, большая Вселенная (крупномасштабная структура Вселенной и элементы космологии)). Такой полнокупольный видеокурс, который можно пройти либо в планетариях, либо с помощью устройств виртуальной реальности, не является заменой урочной системе в школе, но дополняет и закрепляет знания, даваемые учителем, с использованием образного (прежде всего визуального)

восприятия учащихся. Предполагается, что в городах, где есть планетарии, школьники получают возможность 4 - 5 раз в течение учебного года просмотреть соответствующие программы по ключевым темам учебного курса. Используя полнокупольные программы как учебный материал, учитель получает возможность давать соответствующие задания перед просмотром программы, чтобы мотивировать школьников внимательно смотреть фильм во время показа.

Показ программы позволяет давать параграфы учебника, посвященные Солнцу, на самостоятельное изучение, имея в виду, что образное восприятие материала, особенно понятия «солнечные пятна», «протуберанцы», «солнечные вспышки», «солнечные факелы» невозможно адекватно усвоить без наглядного визуального восприятия.

О чем эта программа?

В соответствии с новым вариантом стандарта, российский школьник должен знать следующие понятия, касающиеся темы «Солнце»: строение Солнца, солнечная атмосфера; проявления солнечной активности: пятна, вспышки, протуберанцы; цикличность солнечной активности; солнечно-земные связи. Кроме того, в качестве дополнительного материала, школьники должны быть осведомлены о роли магнитных полей на Солнце.

Все эти темы представлены в полнокупольной программе «Солнце и жизнь Земли», в ее планарном варианте, а также в настоящем пособии. Здесь кратко показано, что представляет собой Солнце как небесное тело, и как Солнце воздействует на Землю и земные процессы.

В программе отмечено, что люди всегда воспринимали Солнце как источник света и тепла, во многих культурах к Солнцу относились как к божеству. Физическая сущность Солнца выяснилась сравнительно недавно, если сравнивать с возрастом человечества. Химический состав Солнца стал известен только в середине XIX века благодаря изобретению спектрального анализа, источник энергии Солнца (термоядерные реакции) удалось выяснить только в середине XX века. В программе

приведены исторические гипотезы, которые предлагались ранее для объяснения факта свечения Солнца.

В программе показаны основные параметры Солнца – размеры, температура в ядре на поверхности, указан механизм происхождения Солнца. Проиллюстрированы процессы ядерного синтеза, происходящие в ядре Солнца под воздействием высоких давления и температуры, показано, как энергия в виде электромагнитного излучения просачивается сквозь толщу солнечного вещества к поверхности, чтобы покинуть Солнце и уйти в межпланетное пространство. Раскрыто понятие «солнечная активность», показано, что собой представляют солнечные пятна, факелы, протуберанцы и вспышки, при этом демонстрируются не нарисованные явления, а реальные фотографии различных проявлений солнечной активности. Показано строение солнечной атмосферы – фотосфера, хромосфера и корона.

Программа дает понятие о феномене цикличности солнечной активности, об 11-летних циклах солнечной активности.

Программа наглядно демонстрирует, как выбросы коронального вещества в процессе солнечных вспышек могут воздействовать на магнитосферу и ионосферу Земли, приводя к возникновению магнитных бурь и полярных сияний. Наглядно воспроизведено, как выглядит полярное сияние во время сильной геомагнитной бури. Программа указывает на возможные опасности экстремальных проявлений солнечной активности для биосферы и техносферы Земли, кратко рассказывает о соответствующей концепции А.Л. Чижевского.

В программе приводятся наглядные доказательства тому, что подавляющая часть энергии, используемой человечеством, связана с Солнцем – включая ветровую энергию, энергию, вырабатываемую гидроэлектростанциями и теплоэлектростанциями, работающими на угле, нефти и газе, поскольку само существование газообразного воздуха, жидкой гидросферы, горючих органических ископаемых обязано трансформированной солнечной энергии. Продемонстрирована необходимость мониторинга солнечной активности, включая события типа вспышек и выбросов коронального вещества, исследований Солнца и его активности.

Основная информация о Солнце и солнечно-земных связях

(в помощь учителю и лектору планетария)

Что такое Солнце?

Солнце – звезда, которую относят к типу желтых карликов спектрального класса G2V. Масса Солнца – 2×10^{30} кг, что составляет 330 000 масс Земли и превышает 99% массы всей Солнечной системы, включающей все планеты Солнечной системы, их спутники, астероиды и метеороиды, объекты пояса Койпера, кометы, пыль и газ. 74% массы Солнца приходится на водород, 24% массы – на гелий. На Солнце присутствуют ядра атомов и всех прочих стабильных химических элементов, но их общая доля не превышает 2% массы Солнца. Вещество, из которого состоит Солнце, находится в газообразном состоянии, но этот газ ионизован из-за высокой температуры: на видимой поверхности Солнца, ниже которой оно становится непрозрачным, температура достигает 6000 К. Теоретические модели дают оценку температуры в центре Солнца порядка 15 млн К. Благодаря своей высокой температуре Солнце испускает окружающее пространство огромное количество энергии в виде электромагнитного излучения. Суммарная мощность этого излучения (светимость Солнца) составляет 4×10^{26} Вт. Солнце вращается вокруг своей оси, совершает один оборот за 25,38 земных суток (сидерический период). Поскольку Земля движется по орбите вокруг Солнца в том же направлении, для земного наблюдателя Солнце совершает один оборот в среднем за 27,2753 земных суток. Этот период характерен для глубоких слоев Солнца, внешние слои отличаются дифференциальностью вращения – скорость вращения на экваторе больше, чем на высоких широтах вблизи полюсов.

Почему Солнце светит?

Этот вопрос интересовал людей всегда, но разобраться в этом удалось только сравнительно недавно.

Английский физик **Юлиус Майер** в XIX веке предполагал, что Солнце разогрето падениями метеоритов, но оказалось, что этот фактор не может объяснить высокую температуру Солнца – в Солнечной системе нет такого количества небесных тел, которые, сталкиваясь с центральной звездой, могли бы настолько нагреть ее.

Немецкий естествоиспытатель **Генрих Гельмгольц** допускал, что под воздействием сильной гравитации Солнце постепенно сжимается и при этом в его недрах выделяется тепло. Однако выяснилось, что этот процесс завершился бы за несколько миллионов лет, тогда как данные геологии и исследования метеоритов показывают, что и Земля, и вся Солнечная система, включая Солнце, существуют в тысячу раз дольше – несколько миллиардов лет (на сегодня возраст Солнца оценивается примерно в 5 миллиардов лет). Очевидно, что Солнце не может быть моложе Земли и астероидов.

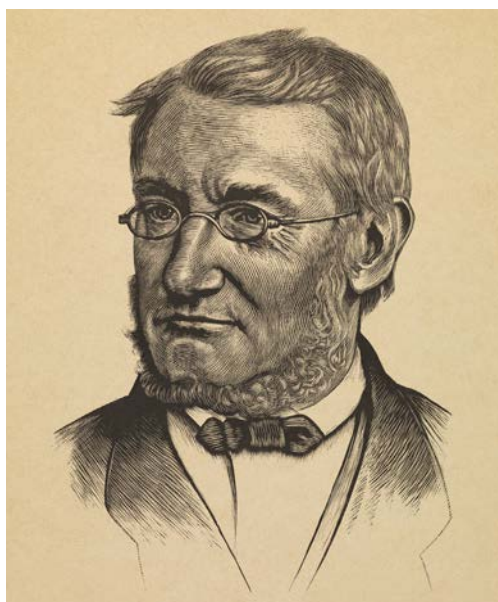


Рис. 1.
Юлиус Роберт Майер
1814–1878



Рис. 2.
Генрих Людвиг Гельмгольц
1821–1894



Рис. 3.
Джеймс Хопвуд Джинс
1877–1946

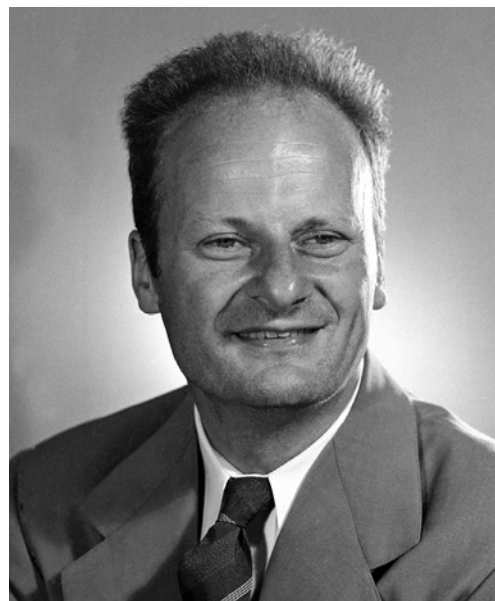


Рис. 4.
Ганс Альбрехт Бете
1906–2005

Английский астрофизик **Джеймс Джинс** после открытия явления радиоактивности предположил, что Солнце разогревается радиацией большого количества ядер радиоактивных атомов. Однако спектральные методы показывают, что таких ядер на Солнце явно недостаточно.

Были и другие гипотезы. В конце тридцатых годов XX века немецкий физик **Ганс Бете**, работавший в США, создал теорию ядерного синтеза, которая оказалась правильной. В рамках этой теории, под влиянием очень высокой температуры в недрах Солнца (15 млн К), а также очень высокого давления (порядка 3×10^{16} Па) запускаются реакции ядерного синтеза (термоядерные реакции). В ходе таких реакций ядра атомов водорода (протоны), взаимодействуя друг с другом, образуют ядра атомов гелия. Поскольку суммарная масса гелия оказывается немного меньше массы протонов, вступающих в реакцию, дефицит массы восполняется рождающимся в ходе реакции электромагнитным излучением. Это излучение (энергичные фотоны гамма-излучения) и являются причиной того, почему Солнце светит вот уже 5 миллиардов лет. Пока хватает водородного топлива (а водорода на Солнце хватит еще на 5 миллиардов лет), термоядерный реактор в центре Солнца будет продолжать работать, превращая водород в гелий и выделяя электромагнитную энергию. Выяснилось, что в ядре Солнца есть и другие типы термоядерных реакций, порождающих излучение.

Как энергия из ядра Солнца попадает наружу?

Гамма-фотоны не могут сразу вылететь из недр Солнца: они окружены веществом, плотно сжатым благодаря огромной гравитации, – плотность раскаленной плазмы в центре Солнца достигает 150 г/см^3 . Фотон тут же поглощается находящейся рядом частицей, эта частица, получив дополнительную энергию, сама излучает новый фотон, на этот раз чуть меньшей энергии. Направление движения переизлученного фотона может оказаться любым – и вверх, и в стороны, и снова вниз. Поэтому в результате громадного количества таких переизлучений проходят сотни тысяч лет, пока потомок фотона, родившегося однажды в центре Солнца, преодолеет всю толщу Солнца (радиус Солнца составляет 700000 км). Наконец, очередной фотон, попав в поверхностный слой, который становится прозрачным для излучения, беспрепятственно покинет Солнце и улетит в межпланетное пространство. Поскольку в ходе бесчисленных поглощений и переизлучения энергия фотона терялась, с поверхности Солнца уходят в космос фотоны уже не гамма-излучения, а менее энергичных диапазонов спектра – больше всего фотонов видимого, а также инфракрасного диапазонов. Излучает Солнце, кроме того, и в ультрафиолетовом, и в радио- диапазонах.

Как устроено Солнце внутри?

Внутренне строение Солнца, согласно современной теории, выглядит следующим образом. Внутри находится самая плотная и самая горячая часть – ядро, где протекают термоядерные реакции. Ядро лежит в пределах от центра до примерно $0,3$ радиуса звезды.

Над ядром находится зона лучистого, или радиативного, переноса. Ее температура и плотность ниже, чем в ядре (хотя по-прежнему очень высоки), поэтому термоядерных реакций здесь уже нет. Через эту зону излучение, поглощаясь и переизлучаясь, постепенно просачивается вверх, к поверхности Солнца.

На расстоянии примерно $0,7$ радиуса от центра начинается конвективная зона. На этой глубине включается конвекция: тепло, поступающее снизу, заставляет потоки водородно-гелиевой плазмы разогреваться,

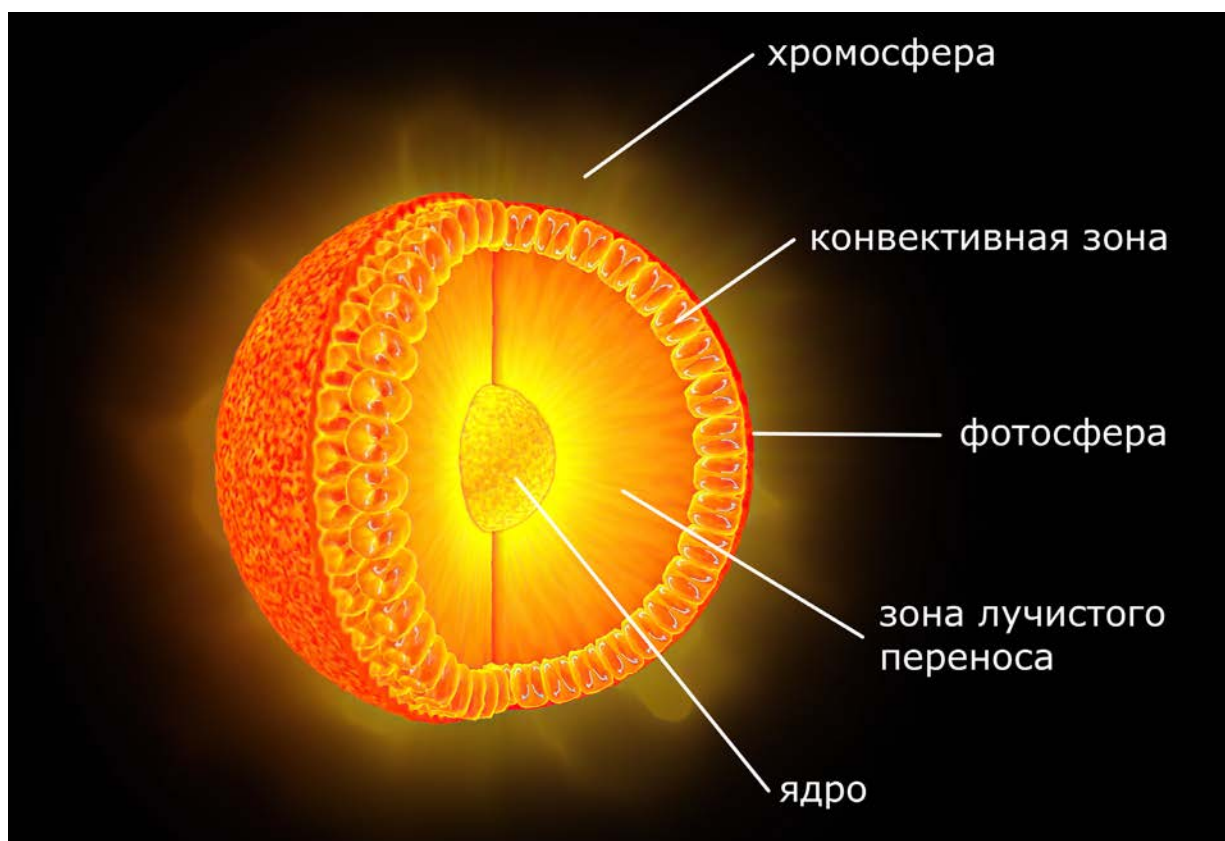


Рис. 5. Строение Солнца

расширяться и всплывать к поверхности. Здесь плазма остывает, отдавая свою энергию излучению, уходящему в космос, и охлаждаясь, опускается обратно в недра конвективной зоны. Возникают конвективные ячейки, в которых совершается постоянный круговорот: горячее вещество всплывает к поверхности Солнца, остывает и опускается вниз, где снова нагревается и поднимается. Этот процесс похож на кипение воды в чайнике, или на варку каши в кастрюле – в обоих случаях тепло поступает снизу, от нагретой плиты, подобно тому, как слой плазмы в конвективной зоне подогревается излучением снизу, от ядра Солнца.

Верхний слой конвективных ячеек достигает уровня, когда плазма становится прозрачной. Это первый слой, который мы можем наблюдать непосредственно, именно с этого уровня фотоны беспрепятственно уходят в окружающее пространство и могут достичь земного наблюдателя. Верхний слой конвективной зоны, с которого уходит излучение, называется фотосферой. Мы видим этот слой как яркую, сияющую поверхность Солнца. При наблюдениях в телескоп на фотосфере можно увидеть верхние части конвективных ячеек – так называемые гранулы, а вся картина видимой солнечной поверхности называется грануляцией.

Правильность наших представлений об устройстве Солнца подтверждается, во-первых, данными «гелиосейсмологии» – анализом колебаний солнечной поверхности, которые порождаются волнами, распространяющимися внутри Солнца. Подобно сейсмологии на Земле, когда анализ сейсмических волн в земной коре позволяет определять внутреннюю структуру Земли, выделяя кору, слои мантии и слоя ядра, гелиосейсмология обеспечивает нас данными о внутреннем строении Солнца и подтверждает существование описанных выше слоев внутри нашей звезды.

Во-вторых, современные нейтринные телескопы эффективно регистрируют солнечные нейтрино – легкие, электрически нейтральные частицы, рождающиеся в ядре Солнца во время термоядерных реакций и свободно проходящие сквозь все слои Солнца. Свойства и количество регистрируемых солнечных нейтрино совпадают с прогнозом и демонстрирует, что описанная теория верна.

В-третьих, параметры Солнца на его поверхности, предсказанные теорией, хорошо соответствует наблюдаемым данным.

Наконец, в четвертых – теория термоядерного синтеза проверена на практике, когда с ее помощью была разработана водородная бомба. Эти испытания показали, что при определенных условиях, которые реализованы в недрах Солнца, действительно происходят термоядерные реакции.

Как устроена атмосфера Солнца?

Условно считается, что огромная непрозрачная масса ионизованного газа, из которого состоит Солнце – это само Солнце, а прозрачный для электромагнитного излучения газ, окружающий Солнце – это солнечная атмосфера.

Слой, где плазма испытывает переход от прозрачного состояния до полной непрозрачности, имеет толщину 400 км – это всего 6 сотых процента радиуса Солнца, т.е. очень тонкий слой. Именно поэтому Солнце на небе кажется очень резко очерченным – 400 км с расстояния почти 150 млн км (средне расстояния от Солнца до Земли) соответствует мизерному углу примерно в половину угловой секунды. Этот слой условно принимается за поверхность Солнца и называется фотосферой. Считается, что фотосфера – нижний слой солнечной атмосферы.

Фотосфера Солнца отличается самой низкой температурой на Солнце – начиная от этого уровня, температура растет и при перемещении вниз (вглубь Солнца), и при перемещении вверх. Температура фотосферы близка к 6000 градусов. Выше уже указано, что для фотосферы характерна картина грануляции, которая хорошо видна в телескопы с высоким разрешением. Каждая гранула имеет типичные размеры около 1000 км и существует в среднем около 8 минут, после чего разрушается и на ее месте возникают новые гранулы.

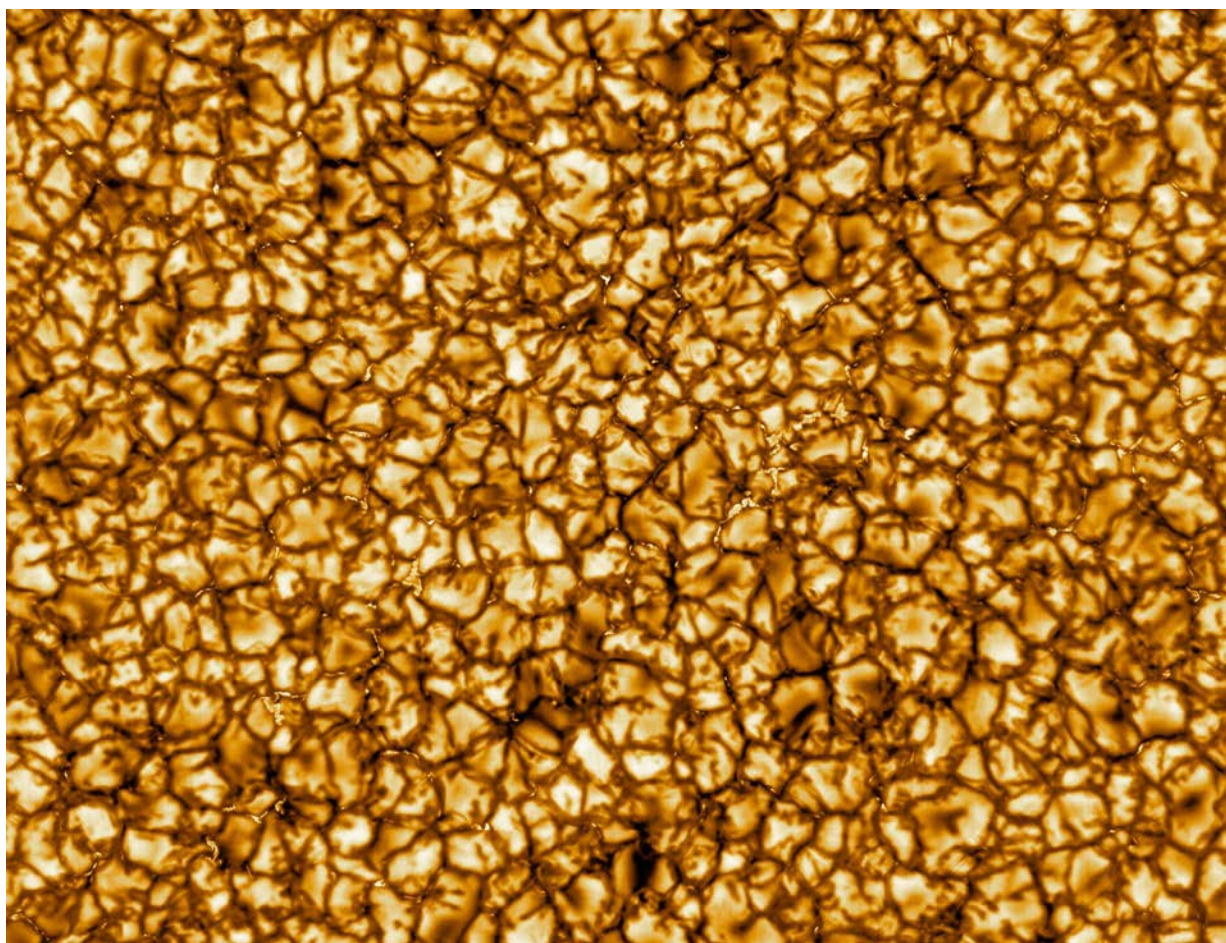
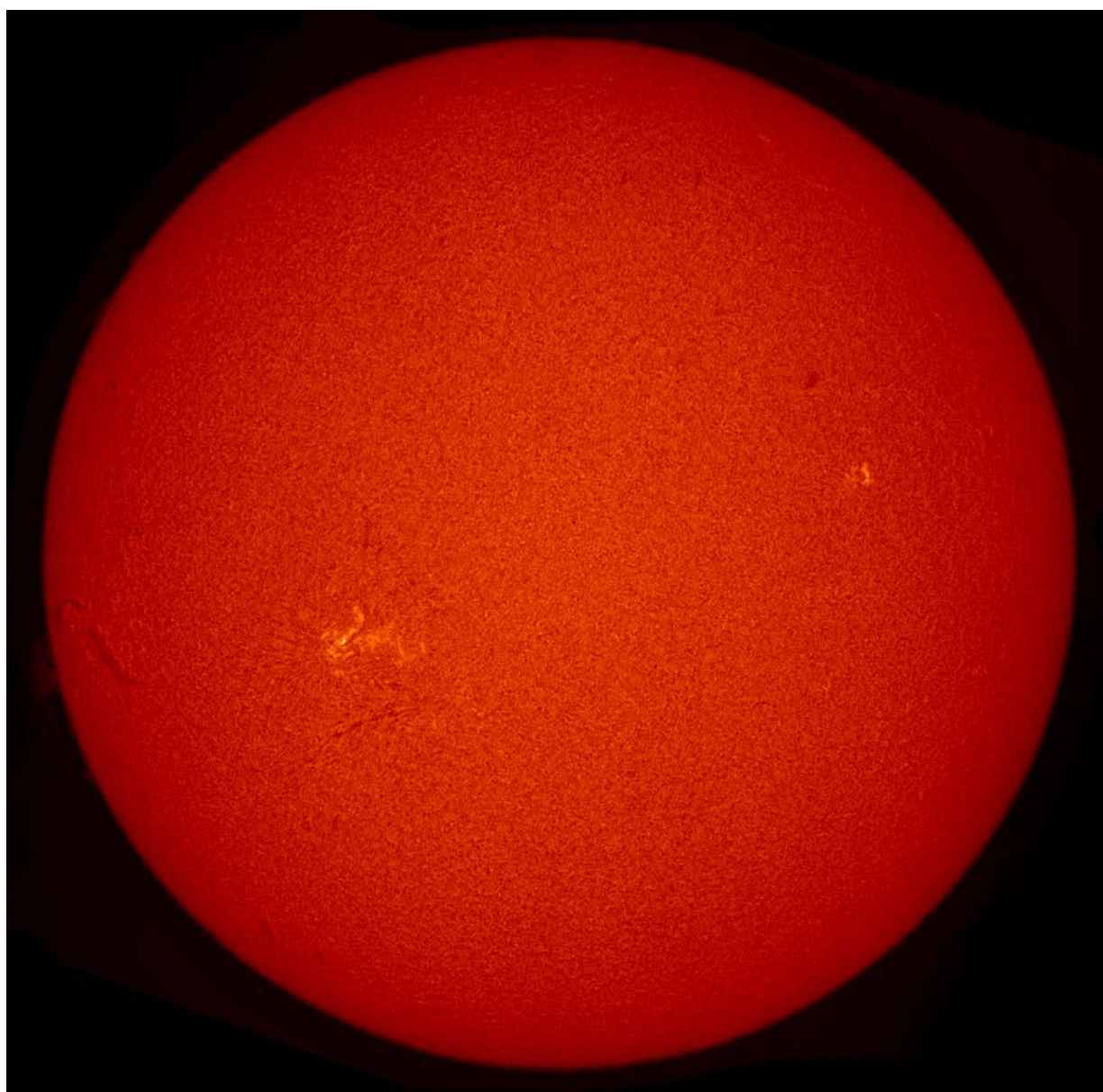


Рис. 6. Солнечная грануляция.

Снимок получен с помощью солнечного телескопа имени Дэниэля К. Иноуи (DKIST), обсерватория Халеакала на острове Мауи, Гавайские острова, США

Хромосфера. Примерно на 12 – 14 тысяч километров выше уровня фотосферы простирается еще один слой солнечной атмосферы – хромосфера. Хромосферу можно увидеть во время полного солнечного затмения (когда Луна перекрывает яркий свет фотосферы) как тонкую

малинового цвета полоску на краю Солнца, либо с помощью специального телескопа-коронोगрафа. Плотность водородно-гелиевой плазмы в хромосфере ниже, чем в фотосфере (плотность падает с высотой), а температура выше. В настоящее время хромосферу наблюдают с помощью специальных фильтров, пропускающих красный свет в линии излучения водорода Н-альфа на длине волны 656,3 нм. Для таких наблюдений используются, например, любительские солнечные телескопы «Коронадо», оснащенные такими фильтрами.



*Рис. 7. Солнечная хромосфера в свете линии водорода Н-альфа.
Снимок обсерватории Канцельхёх, Австрия*

Корона. Выше хромосферы находится внешний слой солнечной атмосферы – корона. Здесь плотность вещества такая же, как в условиях самого высокого лабораторного вакуума на Земле – порядка $10^8 - 10^{10}$ частиц в кубическом сантиметре, но температура существенно выше – вплоть до 1–1.5 млн К (т.е. сравнительно редкие частицы движутся очень быстро). Протяженность короны огромна – много радиусов Солнца. Указать, где заканчивается корона, трудно – плотность плазмы асимптотически падает по мере удаления от Солнца, но так и не уменьшается до нуля в пределах внутренней части Солнечной системы. В определенном смысле можно сказать, что Земля находится внутри солнечной короны. Корону можно увидеть во время полного солнечного затмения, когда Солнце загораживается Луной, и мы видим на фоне потемневшего неба, как яркий свет фотосферы рассеивается на частицах короны – подобно тому, как мы видим дым, освещенный лучом фонарика в темноте.



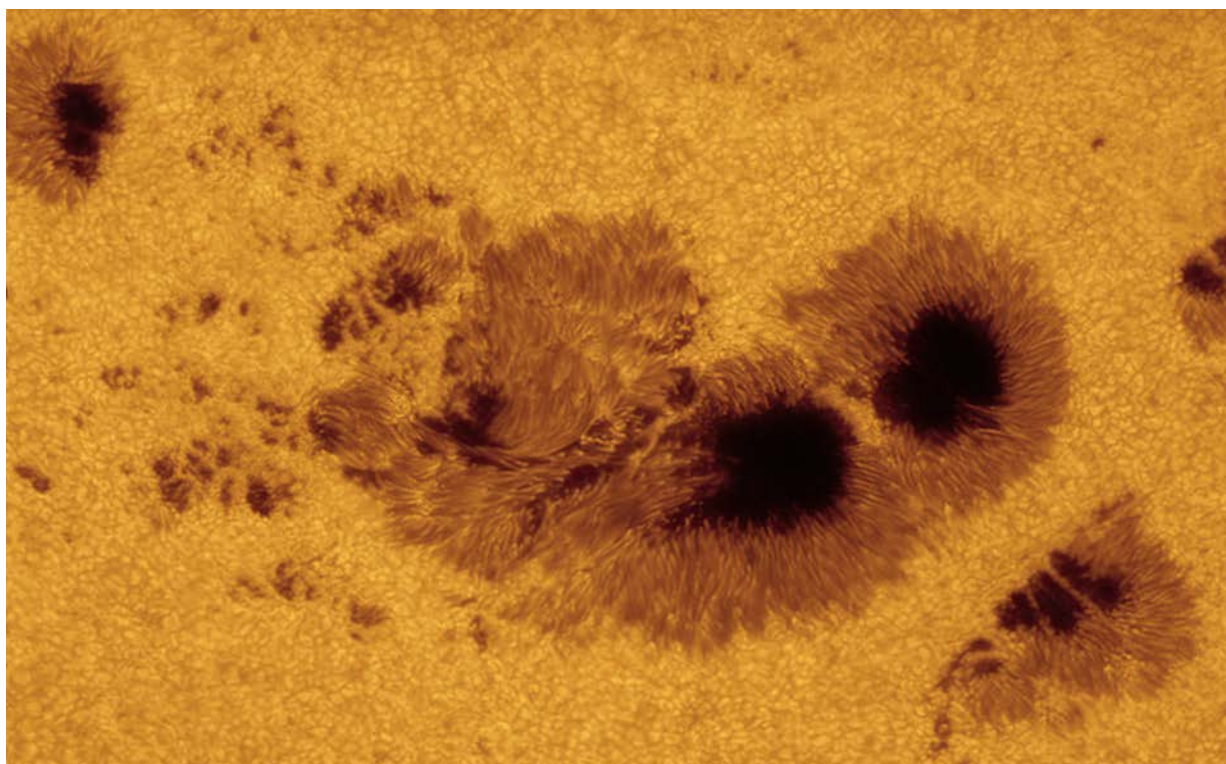
*Рис. 8. Солнечная корона во время полного затмения Солнца, 2006 г.
Снимок экспедиции Института солнечно-земной физики СО РАН,
обсерватория на пике Терскол*

Частицы (в основном ядра атомов водорода и гелия, а также редкие ядра), приобретающие в короне высокие скорости, навсегда уходят от Солнца. Этот расходящийся во все стороны от Солнца поток частиц со скоростью 300–400 км/с называется «солнечный ветер».

Что такое солнечная активность?

На Солнце происходят разнообразные процессы. Еще в древности, глядя на Солнце сквозь дым или дымку как через фильтр, люди иногда видели темные пятна на солнечном диске. Пятна появлялись и через несколько дней исчезали. Изобретение Галилеем телескопа в начале XVII века позволило начать регулярные наблюдения изменений на диске Солнца, которые получили название «солнечная активность». Самым заметным проявлением солнечной активности являются солнечные пятна. На сегодняшний день известно, помимо пятен, множество других типов структур и явлений в солнечной атмосфере, которые возникают, изменяются и исчезают. К проявлениям солнечной активности относятся солнечные пятна, факелы, протуберанцы, вспышки, выбросы коронального вещества, корональные дыры и другие.

Солнечные пятна. Солнечные пятна выглядят как темные (по сравнению с окружающей их фотосферой) образования, возникающие, увеличивающиеся в размерах (иногда размеры солнечного пятна крат-



*Рис. 9. Крупная группа солнечных пятен на фоне грануляции.
Снимок Алана Фридмана*



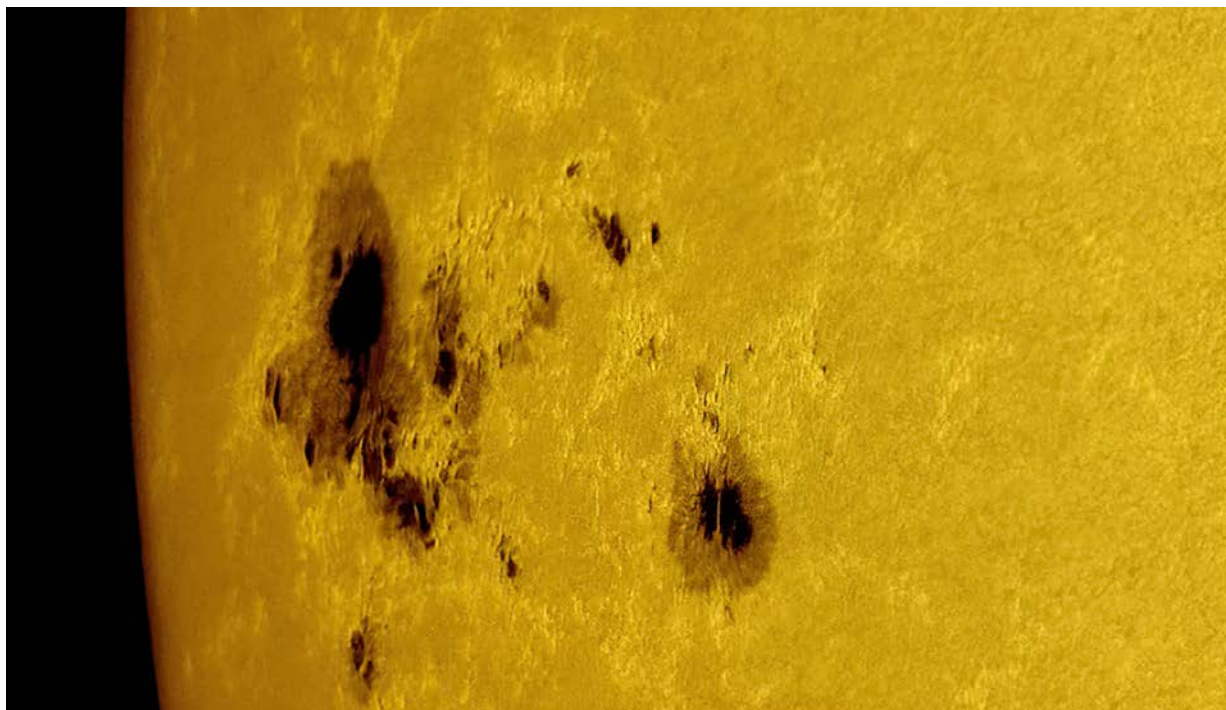
Рис. 10.
Джеймс Эллери Хейл,
1868–1938

но превышают размеры Земли), затем уменьшающиеся и исчезающие. Продолжительность существования пятен бывает разной – от нескольких часов до одного – двух месяцев, чаще всего – нескольких дней. Как правило, пятна появляются не по одному, а группами. В группе пятен бывает до нескольких десятков пятен разных размеров. В начале XX века американскому астрофизику **Джорджу Хейлу** удалось обнаружить, что в солнечных пятнах присутствуют сильные магнитные поля (индукция магнитного поля от 1000 до 3000 Гаусс). Локальное магнитное поле подавляет конвекцию, меняет ее структуру в пятне, в итоге здесь понижается температура, из-за чего пятно выглядит более темным по сравнению с фотосферой.

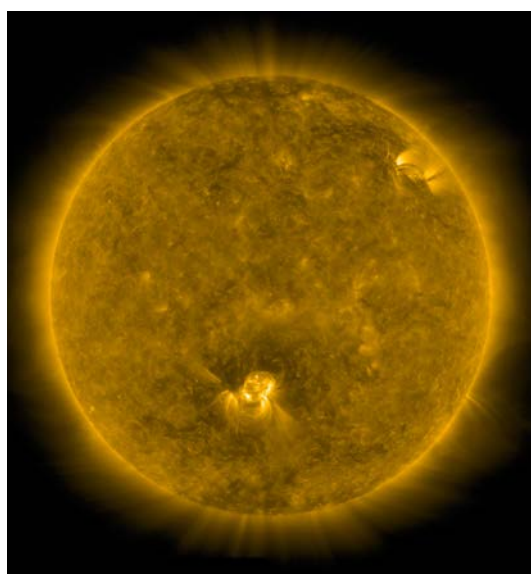


Рис. 11. Солнечный телескоп обсерватории Маунт-Вилсон, США.
Здесь была открыта магнитная природа солнечных пятен

Факелы. Вокруг групп солнечных пятен, как правило, располагаются обширные области, где гранулы выглядят более яркими, чем в «спокойной» фотосфере. Эти яркие образования получили название факелы. В факелах присутствует магнитное поле, но не такое сильное, как в пятнах – как правило, несколько сотен Гаусс, не больше тысячи. Наблюдения хромосферы Солнца показывают, что на месте факелов над ними также находятся яркие образования – флоккулы. Область, где расположена группа пятен и окружающие ее факелы, называется активной областью.



*Рис. 12. Яркие факельные гранулы вокруг солнечных пятен активной области.
Снимок обсерватории Ландкави, Малайзия*



*Рис. 13.
Корона Солнца на длине волны 17,1 нм.
Видны две активные области (светлые участки), над ними – яркие петли магнитного поля.
Снимок космической обсерватории SDO (США)
9 июня 2020 г.*

Протуберанцы. В хромосфере и нижней короне иногда наблюдаются облака сравнительно плотной плазмы – протуберанцы. Их можно наблюдать на краю Солнца во время полных солнечных затмений либо через телескопы-коронографы в виде выступов самой разнообразной формы. При наблюдениях солнечной хромосферы через телескопы с фильтрами протуберанцы на фоне солнечного диска выглядят в виде длинных темных волокон. Измерения магнитных полей на Солнце показали, что протуберанцы (волокна) всегда находятся на границе между областями фотосферы с разной магнитной полярностью. Протуберанцы можно сравнить с магнитным каркасом в хромосфере, который поддерживает плазму и не дает ей под воздействием солнечной гравитации упасть на фотосферу.

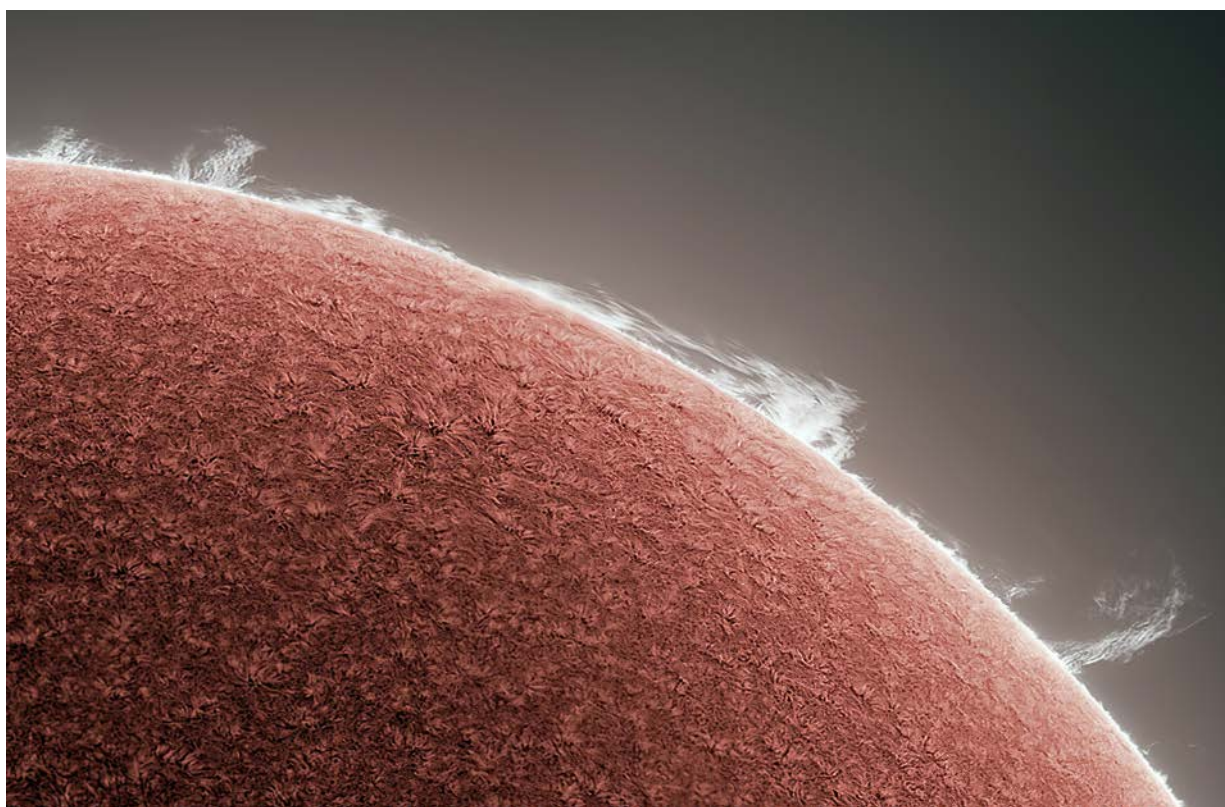


Рис. 14. Солнечные протуберанцы. Снимок Алана Фридмана

Вспышки. В магнитных полях активной области накапливается огромная энергия, здесь текут очень сильные токи (потoki заряженных частиц, или плазмы). Иногда в активной области происходят грандиозные взрывообразные выделения магнитной энергии (солнечные вспышки). Плазма стремительно нагревается до миллиона градусов и более, что

приводит к сильнейшему свечению в рентгеновском, ультрафиолетовом и видимом диапазонах, возникает всплеск мощного радиоизлучения. Сильные магнитные поля ускоряют потоки протонов до огромных скоростей. В отдельных случаях во время вспышки целые сгустки плазмы вместе с их магнитным полем выбрасываются из активной области в окружающее пространство (выбросы коронального вещества). Как правило, солнечная вспышка продолжается несколько минут или десятков минут, в редких случаях мощное излучения постепенно спадает в течение нескольких часов.

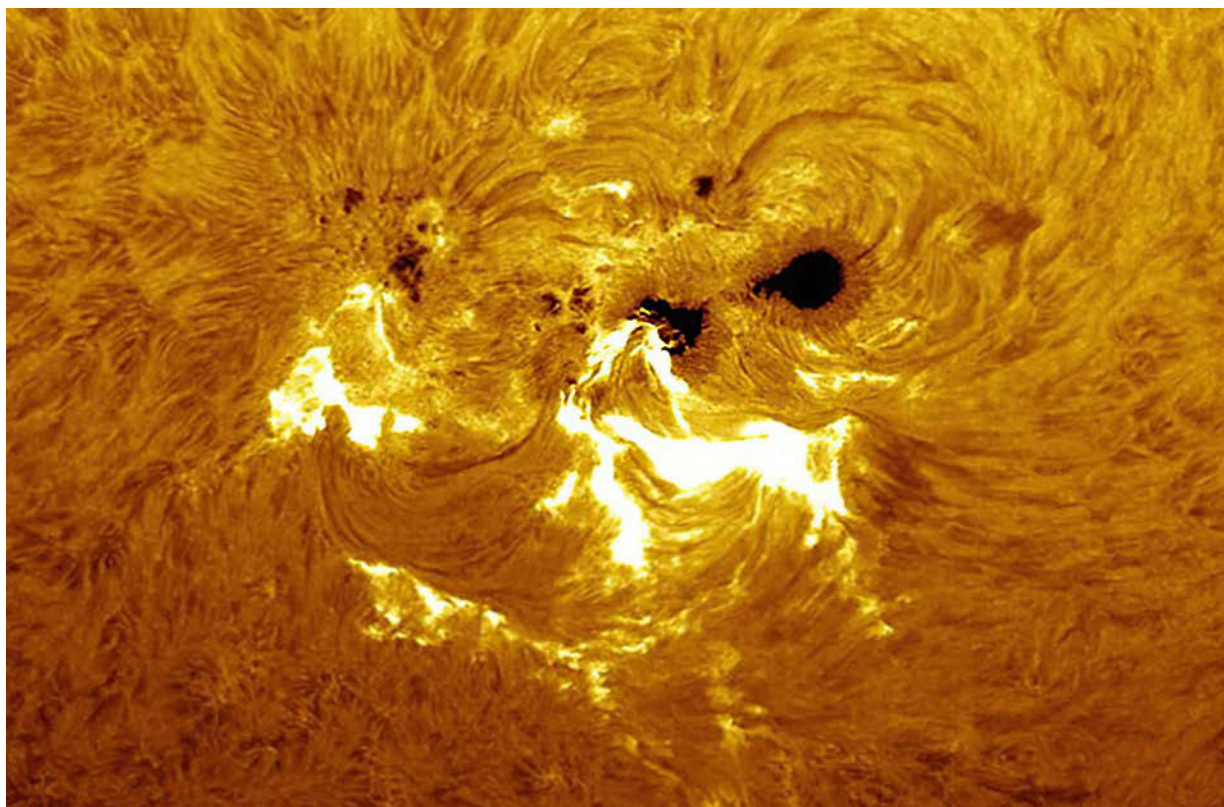


Рис. 15. Солнечная вспышка в хромосфере.

Возле темных солнечных пятен видно ослепительное свечение плазмы, нагретой во время вспышки до миллионов градусов.

Размеры самого крупного темного пятна превышают размеры Земли.

Снимок взят на сайте <http://newsreaders.ru/showthread.php?t=2616>

Цикличность солнечной активности. В середине XIX века был обнаружен феномен цикличности солнечной активности. Он выражается в том, что количество активных областей (групп пятен и окружающих их факельных полей) циклически меняется со временем – то нарастает до высоких значений, когда на Солнце одновременно наблюдаются

десятки активных областей, то уменьшается почти до нуля. Один цикл солнечной активности (от минимума до следующего минимума) продолжается в среднем около 11 лет. Как правило, количество групп пятен, площадь факелов, число вспышек нарастает в течение 3-4 лет, находится на пике максимума 1-2 года и затем спадает почти до нуля в течение 5-6 лет, после чего начинается новый цикл. С каждым новым циклом происходит магнитная «переполюсовка» Солнца: меняются знаки магнитных полярностей на полюсах светила, поэтому полный магнитный цикл Солнца (цикл Хейла) составляет удвоенный 11-летний цикл – 22 года.

Роль магнитных полей. Вся проявления солнечной активности объясняются влиянием магнитных полей на Солнце. Солнце состоит из плазмы, а плазма – это электрически заряженные частицы. Вращение Солнца вокруг своей оси приводит к появлению в недрах Солнца сильных электрических токов, которые, согласно законам физики, порождают магнитное поле. Наружные слои Солнца вращаются дифференциально (точка на экваторе движется быстрее, чем точка на средних широтах, точка на средних широтах – быстрее, чем на высоких широтах и полюсах). Дифференциальное вращение вытягивает, изгибает, скручивает силовые линии магнитного поля в конвективной зоне Солнца. Тесно сплетенные жгуты магнитного поля всплывают к поверхности, и когда достигают фотосферы, формируют солнечные пятна. Более рассеянные магнитные поля формируют факелы вокруг пятен.

Именно сильные магнитные поля активных областей обеспечивают энергией вспышки и выбросы коронального вещества. Постоянное вращение Солнца по инерции на протяжении всего периода его существования приводит к непрерывному рождению и трансформации магнитных полей в конвективной зоне Солнца.

Магнитные поля всплывают к поверхности, поднимаются в хромосферу и корону, формируя активные области и другие проявления солнечной активности. После распада активных областей на их месте в короне иногда возникают обширные области открытого магнитного поля – корональные дыры. Из этих областей магнитные силовые линии протягиваются далеко от Солнца, и вдоль этих линий в межпланетное пространство уходят потоки высокоскоростного солнечного ветра. В отличие от «обычного» солнечного ветра, потоки частиц из корональных дыр движутся со скоростью 700–800 км/с.

Солнечно-земные связи

На Землю непрерывно падает солнечное электромагнитное излучение – от рентгеновского до радиоволн. Благодаря этому, наша планета нагрета до среднегодовой температуры около 15 градусов Цельсия, если вычислить среднее значение по всей поверхности Земли. Коротковолновая (рентгеновская и ультрафиолетовая) радиация приводит к ионизации верхних слоев атмосферы Земли (формируя ионосферу), а в стратосфере создает озоновый слой. Солнце является стабильным источником энергии, поэтому резких колебаний потока солнечной энергии не бывает, и в результате климат Земли на протяжении миллиардов лет меняется в сравнительно небольших пределах, – на нашей планете никогда не закипали океаны и не замерзала атмосфера. Земля оказалась на «удачном» расстоянии от Солнца, благодаря чему на Земле нет такой высокой температуры, как, например, на близкой к Солнцу Венере, и такой низкой температуры, как, например, на удаленном от Солнца Марсе.

Однако на фоне стабильного солнечного излучения иногда возникают проявления солнечной активности. Так, например, когда Земля попадает в высокоскоростной поток солнечного ветра, «дующего» из солнечной корональной дыры, усиливается ионизация верхних слоев земной атмосферы, может произойти слабая магнитная буря. Магнитной, или геомагнитной бурей называется изменение направления и напряженности магнитного поля Земли (геомагнитного поля) под влиянием прилетающих от Солнца заряженных частиц. Во время геомагнитной бури стрелка компаса начинает «метаться», отслеживая изменения в направлении геомагнитного поля, а магнитометры фиксируют быстрые хаотические изменения его напряженности.

Но самые сильные воздействия солнечной активности на Землю связаны с мощными солнечными вспышками. Такие события могут сопровождаться выбросами больших потоков энергичных протонов, вызывая сильную геомагнитную бурю. Заряженные частицы, врываясь в верхние слои земной атмосферы, вызывают свечение – полярные сияния, которые покрывают порой огромные площади. Чем сильнее событие, тем дальше от полюсов простираются зоны свечения. Меняется при этом напряженность электрического поля в атмосфере нашей планеты.



Рис. 16. Полярное сияние. Фото Дмитрия Федорова

Сильные и быстрые изменения геомагнитного поля могут приводить к наведению электрических токов в длинных токонесущих объектах – прежде всего в линиях электропередач. Во время сильнейшей геомагнитной бури, последовавшей после серии мощных вспышек на Солнце в 1989 году, из-за сильного тока, наведенного в обмотке силового трансформатора, на несколько часов была обесточена провинция Квебек в Канаде. Во время самой сильной бури после мощной вспышки 1 сентября 1859 года (событие Кэррингтона) искрились даже провода телеграфа, а полярные сияния наблюдались вблизи экватора. Сильные радиопомехи от солнечной вспышки в 2003 году привели к временному (на 10 минут) отказу спутниковой системы глобального позиционирования GPS. Во время сильных солнечных вспышек и следующих за ними геомагнитных бурь неоднократно фиксировались сбои электронных систем, в том числе на борту спутников, нарушения радиосвязи.

По мере быстрого повсеместного насыщения земной техносферы электронными устройствами становится все более важной их устой-

чивость к помехам во время геомагнитных бурь, порождаемых вспышками на Солнце. Повторение кэррингтоновского события, когда во время мощнейшей вспышки в сторону Земли были выброшены сразу несколько сгустков солнечной плазмы, в наше время может привести к катастрофическим последствиям. Достаточно представить себе беспилотные автомобили, самолеты, корабли, внезапно лишившиеся управления из-за отказа электронных систем навигации вследствие сильной геомагнитной бури, или обесточивание большого города, когда останавливаются лифты, трамваи и троллейбусы, отключаются электронные замки и другие устройства, отключается освещение и электропитание жизненно важных систем.

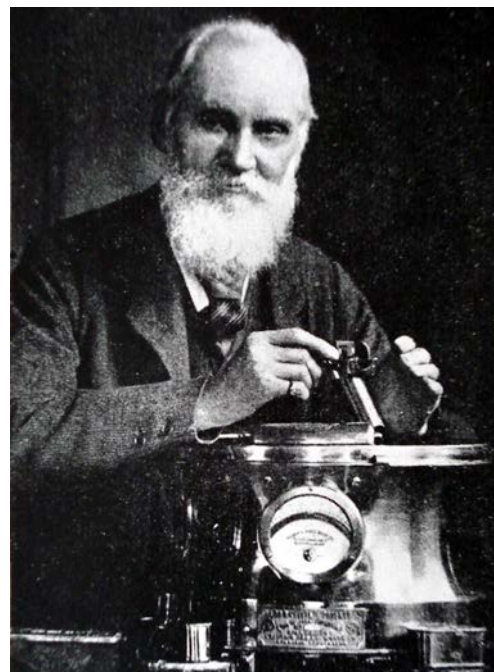


Рис. 17.

*Ричард Кристофер Кэррингтон
(1826 – 1875)*

*впервые наблюдал вспышку
на Солнце 1 сентября 1859 г.*

*Она оказалась сильнейшей
за все время наблюдений
вплоть до настоящего времени*

Влияет ли солнечная активность на живые организмы?

Помимо воздействия на техносферу, всплески солнечного излучения и потоки частиц от вспышки могут влиять на живые организмы. Основы науки о влиянии солнечных явлений на биосферу Земли – гелиобиологии – заложил на рубеже XIX–XX веков российский ученый А.Л. Чижевский. Он обнаружил большое количество типов явлений и событий на Земле, число которых подчиняется одиннадцатилетнему ритму, что, скорее всего, связано с влиянием цикличности солнечной активности. В числе этих явлений – частота заболеваемости разными болезнями, урожайность различных сельскохозяйственных культур, изменения толщины годовых колец деревьев, эпидемии у животных (эпизоотии) и многое другое. Одиннадцатилетнюю цикличность в земных процессах Чижевский наглядно продемонстрировал в своей книге «Земное эхо солнечных бурь».



Рис. 18.
Александр Леонидович
Чижевский
(1897 – 1964)

Помимо того, имеются данные, что некоторые люди ощущают изменения в электрическом и геомагнитном полях Земли, особенно происходящие на определенных частотах. Может ухудшаться самочувствие, изменяться параметры крови и т.д. Эти явления редко бывают ярко выраженными, за многие годы эволюции живые организмы адаптировались к вариациям электромагнитного фона. Однако в ряде случаев, особенно во время редких сильных геомагнитных бурь, такая реакция может оказаться заметной.

А.Л. Чижевский сформулировал и гипотезу о том, что цикличность солнечной активности может влиять на социальные процессы, на напряженность политических процессов в обществе. Справедливость этой гипотезы требует проверки с помощью дальнейших исследований.

Как использовать программу в учебном процессе?

Учебники астрономии, внесенные в утвержденный Министерством просвещения РФ федеральный перечень, а также многие учебно-методические пособия содержат обязательных несколько параграфов, посвященных Солнцу, его устройству, солнечной активности и солнечно-земным связям.

Эти темы могут изучаться классическим урочным способом. Можно рекомендовать учителю использование на одном из уроков планарного учебного видеофильма, подготовленного на основе полнокупольной программы «Солнце и жизнь Земли». Если есть возможность, имеет смысл показать школьникам полнокупольный вариант программы под куполом планетария.

Перед просмотром учебной программы учитель может дать задание школьникам целенаправленно просмотреть программу, чтобы получить, уяснить и сформулировать ответы на определенный перечень вопросов по теме.

Вопросы могут быть следующими:

1. Каковы размеры и масса Солнца? Во сколько раз Солнце больше Земли?
2. Что такое Солнце – планета или звезда? Почему?
3. Почему Солнце светит (каков источник энергии Солнца, которое стабильно излучает уже 5 миллиардов лет)?
4. Как устроено Солнце внутри? (рассказать о зонах внутри Солнца)
5. Как устроена атмосфера Солнца? (рассказать о слоях солнечной атмосферы)
6. Что такое солнечная активность? Какие основные типы солнечной активности известны?
7. Что такое цикличность солнечной активности?
8. Что такое геомагнитная буря? Какова причина возникновения геомагнитных бурь?
9. В чем проявляется опасность солнечных вспышек?

Учитель может дать либо все, либо некоторые из этих вопросов, чтобы разобрать ответы после просмотра. Целенаправленный просмотр программы повышает внимательность, структурирует восприятие получаемой визуальной и вербальной информации. После просмотра школьники могут устно или письменно ответить на данные вопросы.

Как использовать тему «Солнце и жизнь Земли» для подготовки докладов и проектов?

Темы, касающиеся Солнца и солнечной активности, могут использоваться для подготовки докладов и выполнения школьниками учебно-исследовательских проектов, включая обработку ежедневных наблюдений солнечных пятен, получаемых космической обсерваторией SDO (снимки обновляются на сайте <https://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>).

Можно проводить мониторинг групп солнечных пятени солнечных вспышек с использованием отечественного сайта https://tesis.lebedev.ru/active_areas.html, где ежедневно обновляются данные о наблюдаемых на Солнце группах пятен, их координатах на солнечном диске, их площадях и размерах, количестве пятен в группе, а также солнечных вспышках в рентгеновском диапазоне и геомагнитных бурях.

Какие дополнительные ресурсы могут быть использованы при изучении темы «Солнце»?

Может быть рекомендована для внеклассного чтения научно-популярная книга С.А. Язева «Лекции о Солнце», адресованная школьникам и любителям астрономии (АСТ, 2018).



Глоссарий

Активная область на Солнце – область на Солнце, включающая в себя группу пятен и окружающие ее факелы. В хромосфере и короне над активной областью могут находиться высокие петли магнитного поля, по которым течет плазма.

Геомагнитная буря – изменения направлению и напряженности геомагнитного поля (магнитного поля Земли), продолжающиеся в течение нескольких часов (в отдельных случаях в течение нескольких суток) под влиянием потока заряженных частиц, поступающих от Солнца.

Дифференциальное вращение Солнца – особенность вращения Солнца вокруг своей оси. Эта особенность заключается в том, что верхние слои Солнца вращаются с разной угловой скоростью в зависимости от широты: на низких широтах – быстрее, на высоких – медленнее. Так, во внешней системе координат, связанной с далекими звездами (сидерической), период вращения точки на экваторе Солнца составляет 24,47 суток, а для наблюдателя на Земле – 26,24 суток (синодический период). Вблизи полюсов Солнца сидерический период вращения оказывается близким к 30 суткам, а синодический – к 32 суткам. Обычно для описания вращения Солнца используется так называемая кэррингтоновская скорость вращения, характерная для точек на широтах 16 гелиографических градусов. На этой широте сидерический период обращения равен 25,38 суток, синодический – 27,2753 суток. Примерно с такой скоростью вращаются солнечные пятна, возникающие в диапазоне широт от 0 до 30 градусов.

Зона лучистого переноса – слой в недрах Солнца в пределах примерно от 0,3 до 0,7 радиуса Солнца. Температура внутри этой зоны уменьшается от 6,8 млн К на нижней границе до 2,4 млн К на верхней границе. Этого недостаточно для протекания термоядерных реакций, они происходят ниже (глубже), в ядре Солнца. В зоне лучистого переноса энергия пе-

переносится электромагнитным излучением (фотонами). Зона лучистого переноса вращается твердотельно (не дифференциально).

Конвективная зона – слой в недрах Солнца в пределах примерно от 0.7 радиуса Солнца до 1.0 радиуса (уровень фотосферы). Температура внутри этой зоны уменьшается от 2.4 млн К на нижней границе до примерно 6 тысяч К на уровне фотосферы. В конвективной зоне энергия переносится снизу вверх конвективными восходящими потоками плазмы. Вблизи уровня фотосферы вещество остывает и опускается обратно, вглубь конвективной зоны, где снова нагревается и снова поднимается; такие движения формируют конвективные ячейки. Конвективная зона вращается дифференциально, где скорость вращения зависит от широты и от глубины.

Протуберанцы – облака плазмы в хромосфере и короне Солнца, поддерживаемые магнитными полями.

Солнечная активность – совокупность разных типов процессов и явлений магнитной природы, наблюдаемых в атмосфере Солнца. К разряду проявлений солнечной активности относятся солнечные пятна, факелы, протуберанцы, вспышки, выбросы коронального вещества, корональные дыры и т.д.

Солнечная вспышка – взрывообразное высвобождение энергии, запасенной в магнитном поле активной области. Общее количество энергии вспышки, выделяющейся во всех диапазонах электромагнитного излучения (от рентгеновского до радио), а также энергии, идущей на ускорение заряженных частиц и корональных выбросов вещества составляет 10²¹–10²⁵ Дж.

Солнечные пятна – относительно темные образования, наблюдаемые на фоне фотосферы Солнца, представляющие собой срезы (сечение) вертикальных жгутов сильного (1000–3000 Гс) магнитного поля, выходящих из-под фотосферы. Поскольку магнитное поле пятен частично подавляет конвекцию, температура пятен оказывается ниже температуры окружающей фотосферы (4500–5000 К), благодаря чему пятна излучают меньше и кажутся темнее окружающего фона.

Солнце – звезда, относящаяся к типу желтых карликов. Масса 2×10^{30} кг, диаметр на уровне фотосферы – 1392 000 км (109,1 диаметра Земли),

объем – около 1300 000 объемов Земли, средняя плотность – 1.4 г/см^3 . Светимость Солнца составляет 4×10^{26} Дж. Температура в центре Солнца превышает 15 млн К, температура фотосферы – около 6000 К. Возраст Солнца – около 5 млрд лет.

Термоядерные реакции (реакции ядерного синтеза) – реакции превращения ядер атомов водорода в ядра гелия под воздействием высокой температуры и высокой плотности в ядре Солнца. При этом примерно 4.2 млн тонн водорода каждую секунду превращаются в электромагнитное излучение

Факелы – гранулы повышенной яркости, окружающие группы пятен (факельные площадки). Обладают максимальным контрастом на расстоянии примерно 60 градусов от центра солнечного диска, в центральной части диска Солнца не выделяются.

Флоккулы – яркие образования в хромосфере (верхняя часть фотосферных факелов).

Ядро Солнца – центральная часть Солнца, глубинный слой в недрах Солнца от центра до примерно 0,3 радиуса Солнца. Температура внутри ядра уменьшается от 15–16 млн К в центре Солнца до примерно 6,8 млн К на нижней кромке зоны лучистого переноса. В ядре Солнца протекают термоядерные реакции превращения водорода в гелий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Куликовский П.Г. Справочник любителя астрономии. Любое издание.
2. Пасачофф Джей М. Солнце = занимательная астрономия: все тайны нашей звезды – Солнце. М.: АСТ:Астрель, 2008 – 332 с.
3. Попов Сергей. Вселенная. Краткий путеводитель по пространству и времени: от Солнечной системы до самых далеких галактик и от Большого Взрыва до будущего Вселенной. – М.: Альпина нон-фикшн, 2018. – 400 с.
4. Уайтхаус Дэвид. Биография Солнца. – М.: Эксмо, 2008. – 368 с.
5. Язев С.А. Лекции о Солнце. Москва : Издательство АСТ, 2018 – 320 с.

Автор

Сергей Артурович Язев,

доктор физико-математических наук,
директор астрономической обсерватории Иркутского государственного университета, старший научный сотрудник Института солнечно-земной физики СО РАН, член правления Ассоциации планетариев и лиц, содействующих их развитию.

© Сергей Артурович Язев

Москва – Иркутск
2021