

Атмосфера Солнца: слои, температура и солнечная активность

Как устроена атмосфера нашей звезды и почему это важно?



Зачем изучать атмосферу Солнца



Солнце определяет условия на Земле, а его атмосфера — место, где рождаются видимые проявления активности. Понимание этих процессов помогает объяснять поведение звёзд и оценивать влияние солнечных вспышек на технологии.

Строение солнечной атмосферы и её основные слои



01

Фотосфера



Это нижний и самый плотный слой, который мы видим как поверхность Солнца. Его толщина невелика, но именно здесь формируется основная часть видимого света и большинства деталей изображения.

02

Хромосфера



Над фотосферой располагается более разреженный слой, заметный при наблюдении линии Н-альфа. Он простирается на несколько тысяч километров и содержит множество быстро меняющихся структур плазмы.

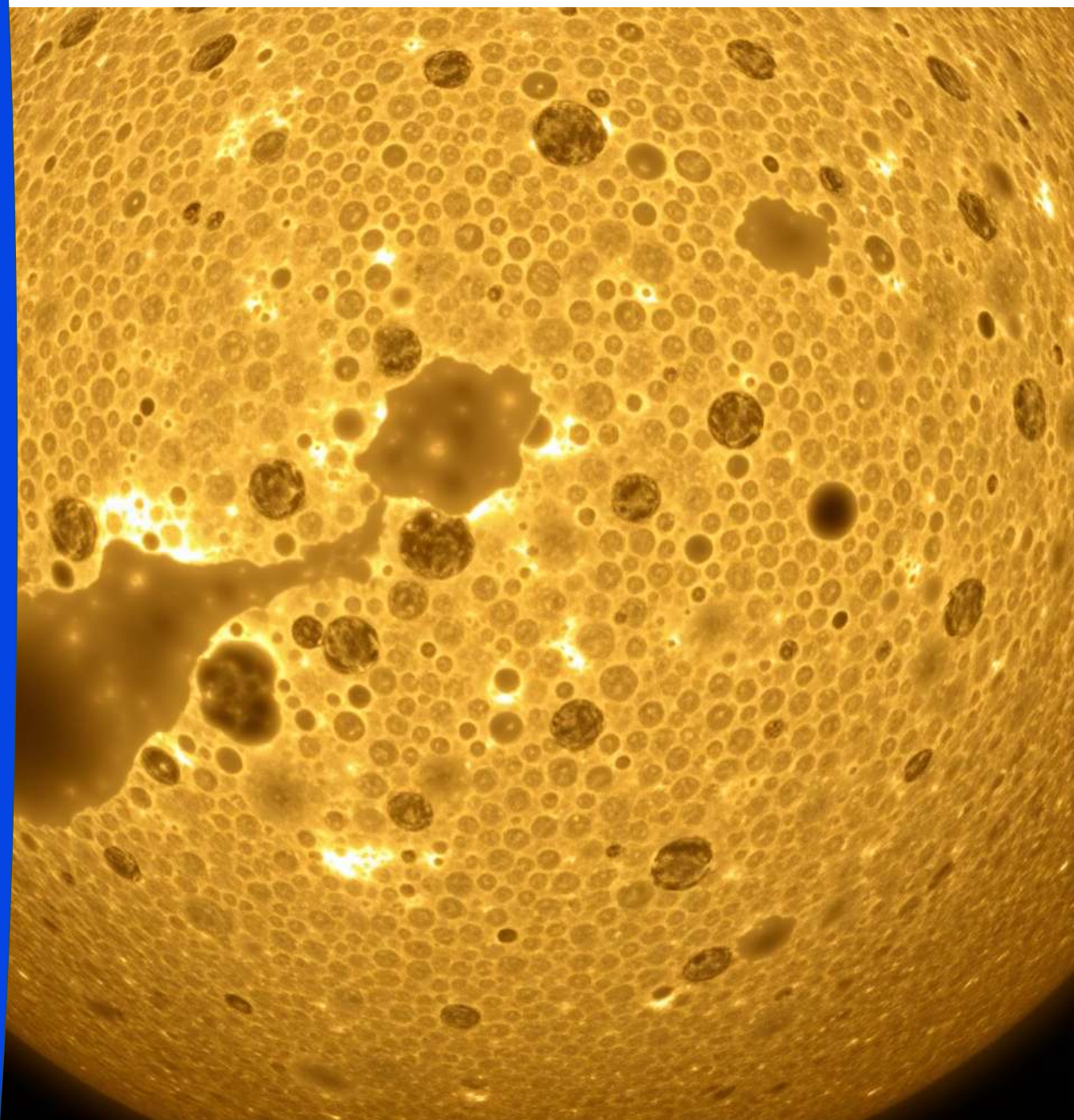
03

Корона



Внешняя оболочка Солнца чрезвычайно разрежена, но простирается далеко в космос. Её можно увидеть во время полного затмения, когда она проявляется как слабое сияние вокруг диска.

Фотосфера: грануляция, солнечные пятна и спектр

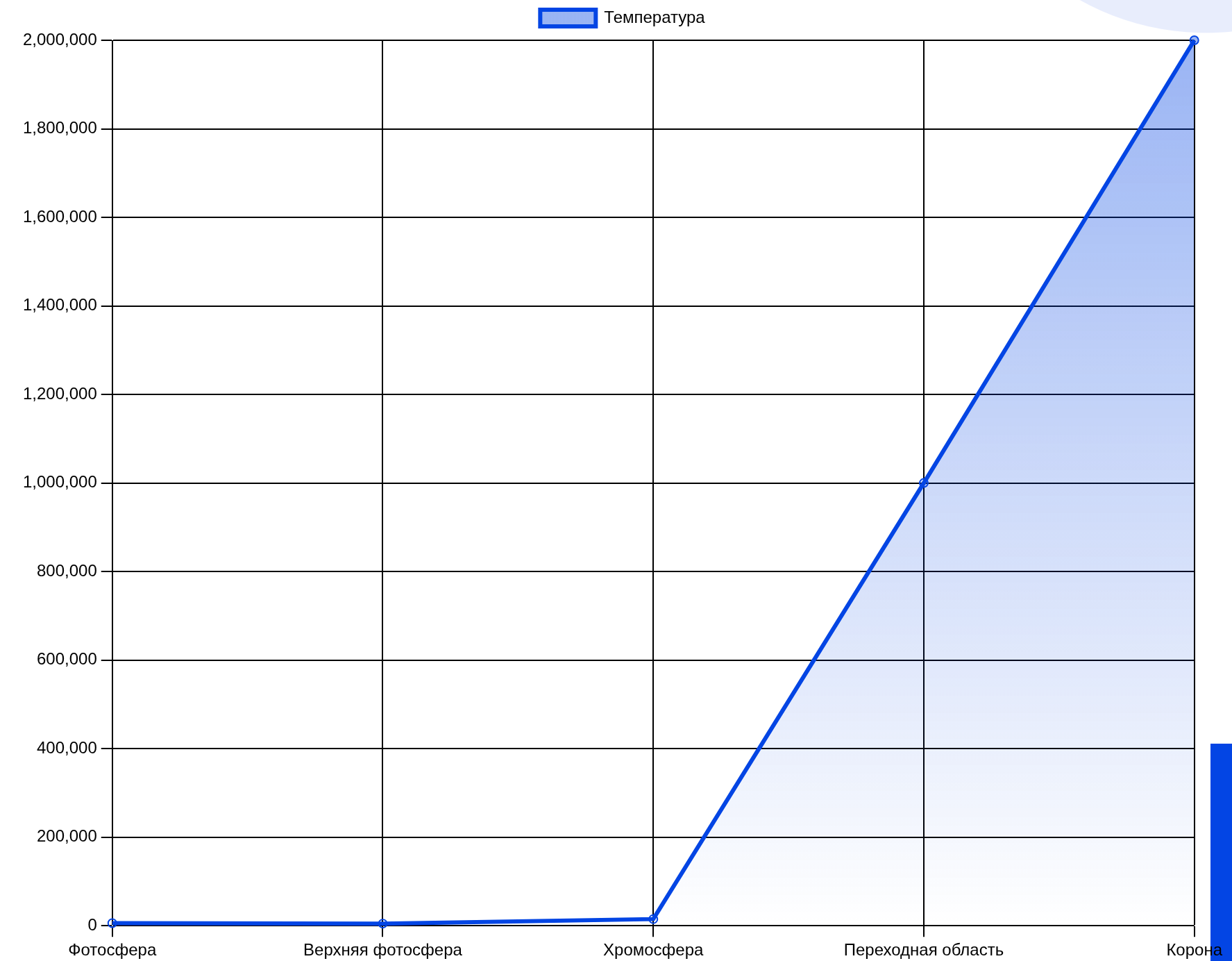


- **Температура поверхности**
Температура фотосферы составляет около 5770 К. Именно этот слой даёт большую часть видимого излучения Солнца и служит отправной точкой для сравнения с более высокими слоями атмосферы.
- **Грануляция**
Поверхность выглядит зернистой из-за гранул — областей подъёма и охлаждения вещества в конвекции. Отдельные гранулы имеют размеры порядка 1000 км и живут сравнительно недолго.
- **Солнечные пятна**
Пятна кажутся тёмными, потому что они холоднее окружающей фотосферы на 1500–2000 К. Они возникают там, где сильное магнитное поле подавляет обычный перенос энергии.
- **Спектральные линии**
В спектре фотосферы видны тёмные линии поглощения. Их изучение позволило определить химический состав Солнца и стало одним из ключевых достижений солнечной спектроскопии.
- **Неоднородность слоя**
Фотосфера не является ровной оболочкой: её структура постоянно меняется под действием движения вещества и магнитных полей, поэтому именно здесь лучше всего заметны активные области.

Изменение температуры от фотосферы к короне

На графике видно, что солнечная атмосфера нагревается наружу, а не остывает, как многие ожидают. Это одно из главных физических противоречий, которое ещё требует объяснения.

Резкий рост температуры указывает на сложный перенос и высвобождение энергии в магнитной плазме. Особенно необычен скачок в переходной области.



Данные школьного курса астрономии и наблюдений
солнечной атмосферы

Хромосфера как область быстрых движений плазмы



Линия Н-альфа

Хромосфера лучше всего различима в узком красном диапазоне водорода. При специальных наблюдениях она приобретает характерный розовато-красный оттенок и становится особенно выразительной.



Спикулы и потоки

В этом слое постоянно возникают тонкие выбросы плазмы — спикулы. Они поднимаются и исчезают очень быстро, показывая, насколько динамична и неустойчива хромосфера.



Протуберанцы и волокна

Над поверхностью и на краю солнечного диска видны вытянутые структуры из более холодной плазмы. Их форма зависит от магнитного поля и может меняться за короткое время.

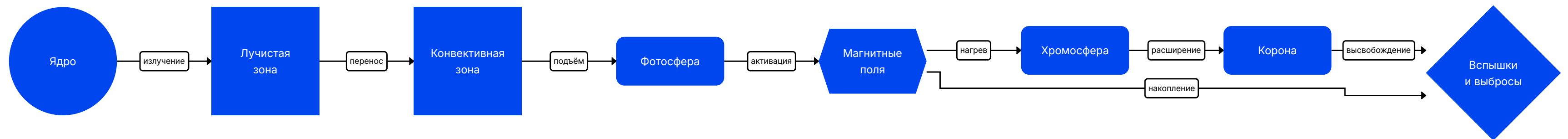


Вспышечные осветления

Хромосфера участвует в развитии солнечных вспышек, когда энергия высвобождается особенно быстро. Такие процессы сопровождаются яркими изменениями и сильным воздействием на верхние слои атмосферы Солнца.

Путь энергии от недр Солнца к атмосфере

Схема показывает, как энергия, рожденная в ядре, достигает внешних слоёв и запускает активные процессы.



Корона — внешняя атмосфера и источник солнечного ветра

01

Чрезвычайная разреженность

Корона состоит из очень разреженной плазмы, но её температура достигает миллионов градусов. Поэтому она остаётся одним из самых необычных и трудных для объяснения слоёв солнечной атмосферы.

02

Наблюдение в высоких энергиях

Лучше всего корона видна в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Эти наблюдения помогают изучать горячие структуры, которые почти не заметны в обычном видимом свете.

03

Солнечный ветер

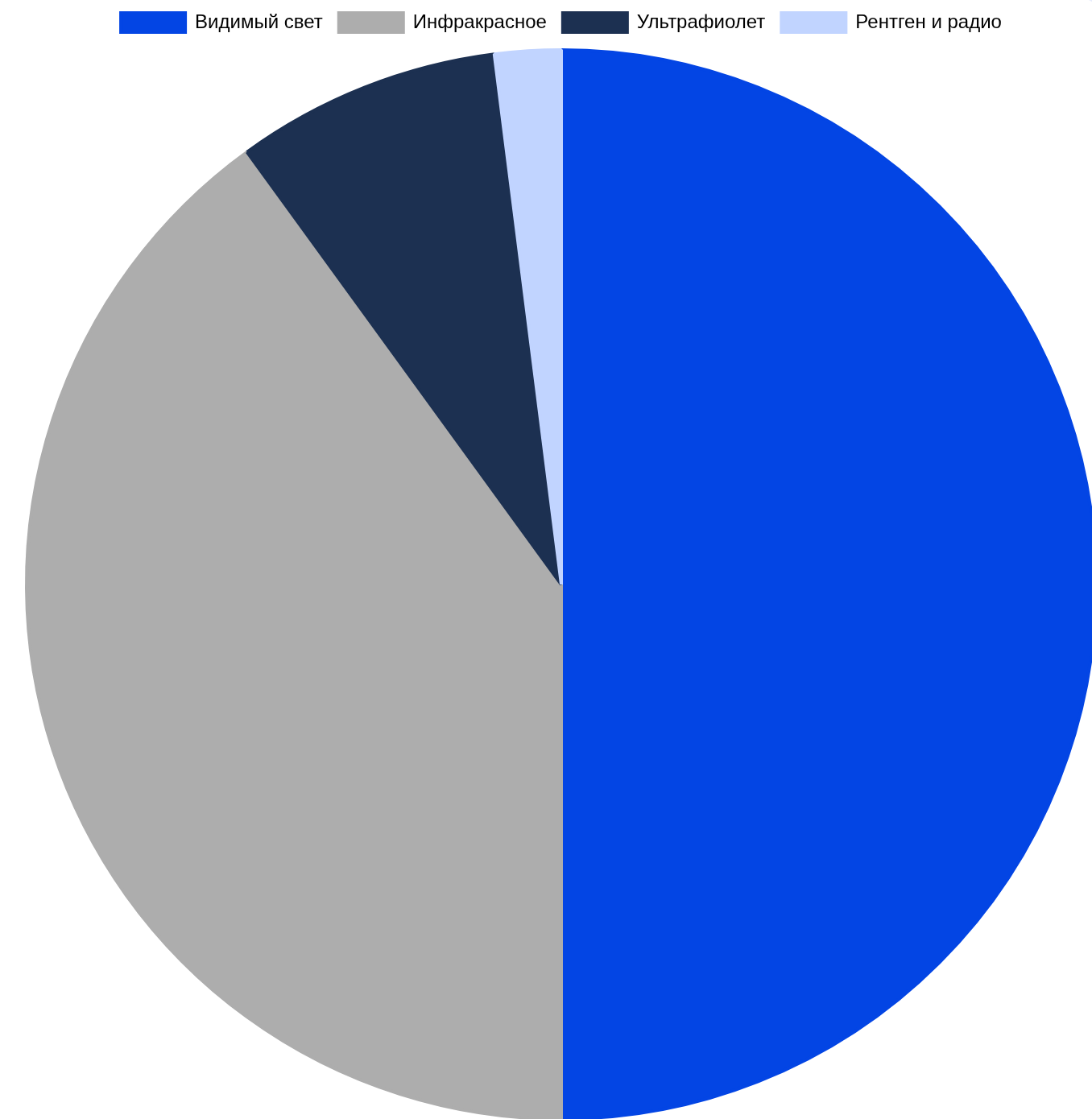
Из короны непрерывно истекает поток заряженных частиц. Он движется со скоростью примерно 300–800 км/с и влияет на межпланетное пространство и магнитную оболочку Земли.



Распределение энергии солнечного излучения по диапазонам

Хотя высокоэнергетические диапазоны занимают малую долю, именно они сильнее всего меняют состояние верхней атмосферы Земли и условия распространения радиоволн.

Основная энергия Солнца сосредоточена в видимом и инфракрасном диапазонах, но для космической погоды особенно важны даже малые доли ультрафиолета и рентгена.



Школьный курс астрономии; обобщённые данные
спектрального распределения солнечного излучения



Сравнение основных слоёв атмосферы Солнца

Таблица показывает, как меняются температура, плотность и наблюдаемые явления по мере удаления от видимой поверхности Солнца.

Слои различаются прежде всего температурой и плотностью: чем выше, тем горячее и разреженнее среда, что делает атмосферу Солнца необычной по сравнению с ожиданиями.

Слой	Температура	Признаки	Протяжённость
Фотосфера	≈5770 К	гранулы, пятна	400–500 км
Хромосфера	10–20 тыс. К	Н-альфа, спикулы	неск. тыс. км
Корона	1–3 млн К	петли, ветер	млн км

Данные школьного курса астрономии и наблюдений солнечной атмосферы





11 лет

в среднем длится солнечный цикл, связанный
с ростом и спадом числа пятен, вспышек
и корональных выбросов массы.

Школьный курс астрономии; наблюдения солнечного цикла
по числу пятен (средний цикл Швабе).

Такой ритм помогает предсказывать
периоды усиленной активности
и повышенного риска космической погоды.



Как солнечная вспышка влияет на Землю

Схема основана на типичном времени распространения излучения и плазмы от Солнца до окрестностей Земли.



Методы наблюдения солнечной атмосферы



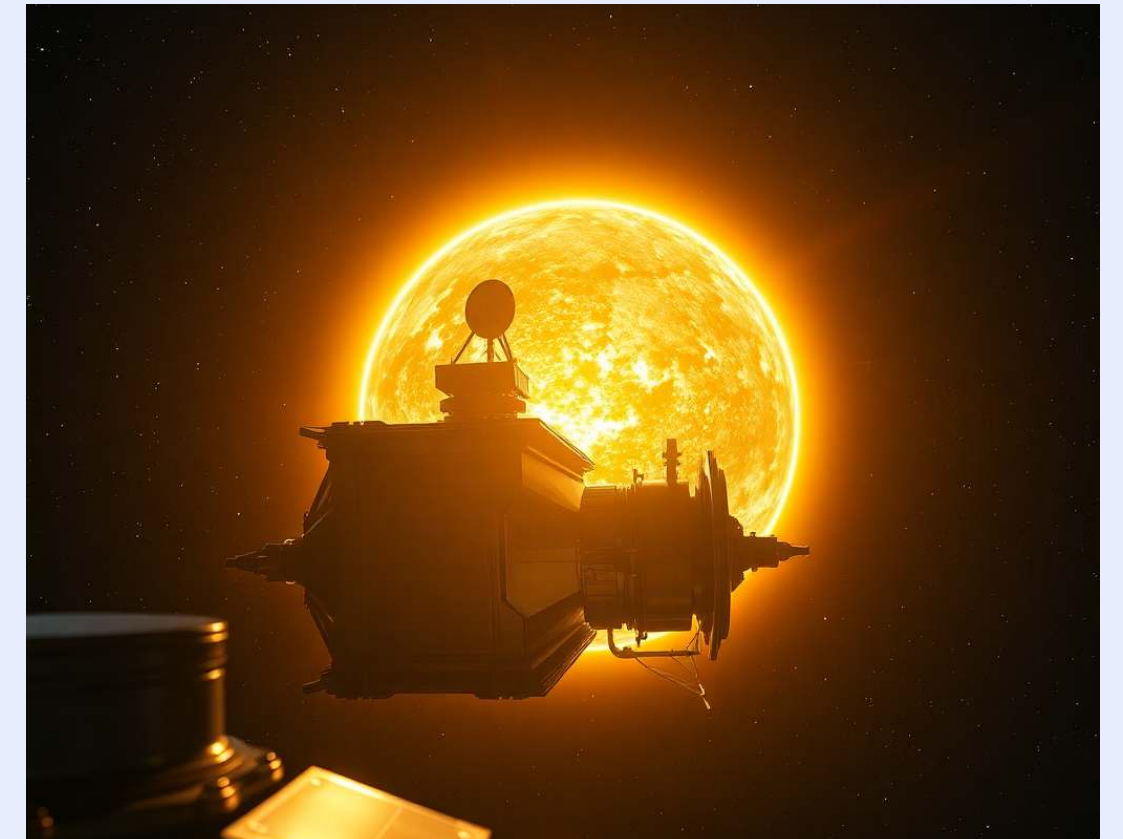
Наземные телескопы и линия Н-альфа

На земле солнечную атмосферу изучают через фильтры, спектрографы и специальные телескопы. Линия Н-альфа позволяет увидеть хромосферу, спиккулы и протуберанцы, а вблизи пятен — тонкие детали активных областей, которые неразличимы в обычном белом свете.



Магнитограммы: карта невидимой силы

Магнитограммы показывают, где магнитное поле усиливается, ослабевает и меняет направление. По ним можно проследить, как формируются пятна, почему возникают петли и где в атмосфере накапливается энергия, способная перейти во вспышку или выброс массы.



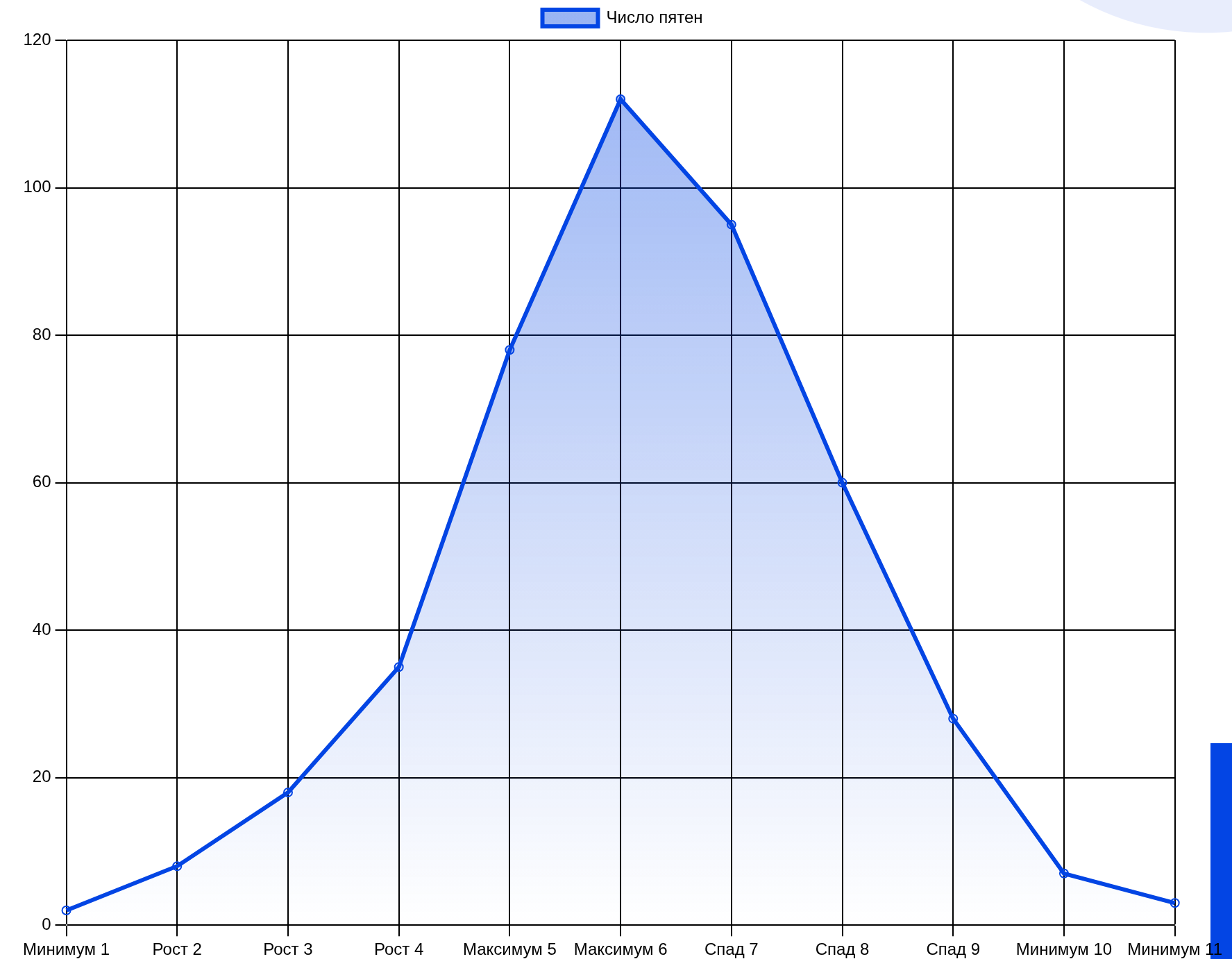
Космические обсерватории без атмосферных помех

SOHO, SDO и Parker Solar Probe работают вне земной атмосферы, поэтому фиксируют ультрафиолет, корону и частицы у Солнца значительно точнее. Их данные дополняют наземные наблюдения и позволяют связать процессы у поверхности с явлениями в далёкой короне.

Солнечный цикл и изменение числа пятен

График отражает неравномерность активности: цикл растягивается примерно на одно десятилетие, но отдельные максимумы могут быть разными по силе.

Когда пятен больше, возрастает вероятность вспышек и корональных выбросов массы; минимум цикла означает более спокойную атмосферу.



Обобщённые данные наблюдений солнечных пятен;
средний 11-летний цикл Швабе.

Солнечные пятна, факелы и активные области



Солнечное пятно

Тёмное пятно появляется там, где сильное магнитное поле подавляет конвекцию. Обычно видны тень и полутень, а сами пятна часто образуют группы или пары.



Факел

Факелы заметны как более яркие участки вокруг усиленного магнитного поля. Они нередко соседствуют с пятнами и помогают выявить активную область даже тогда, когда тёмные детали ещё слабо выражены.



Активная область

Активная область быстро меняется в течение часов и дней, потому что её магнитная структура нестабильна. Именно здесь чаще возникают вспышки, петли и другие признаки напряжённой атмосферы.

Основные проявления солнечной активности и их последствия

Явление	Длительность	Последствия
Вспышка	минуты–часы	радиопомехи
Протуберанец	часы–дни	плазменный выброс
КВМ	часы	геомагнитная буря
Полярное сияние	минуты–часы	свечение неба

Разные явления отличаются масштабом, длительностью и влиянием на околоземное пространство.

Наиболее опасны для техники вспышки и корональные выбросы массы: они развиваются быстро и способны резко изменить состояние околоземной среды.

Школьный курс астрономии; наблюдения
проявлений солнечной активности.

Влияние солнечной атмосферы на Землю и техносферу



01

Ионосфера реагирует первой

Коротковолновое излучение Солнца быстро меняет ионизацию верхней атмосферы. Из-за этого сигналы радиосвязи распространяются иначе, а качество приёма может резко ухудшаться даже без видимой бури.



03

Спутники и сети под нагрузкой

Частицы солнечного ветра могут нарушать работу электроники на орбите и вызывать индуцированные токи в протяжённых линиях электропередачи. Это повышает требования к защите инфраструктуры и мониторингу космической погоды.



02

Навигация становится менее точной

Во время геомагнитных возмущений возрастает ошибка в GPS и других спутниковых системах. Причина в том, что плазма и возмущённое магнитное поле искажают



04

Полярные сияния как видимый знак

Сияния возникают, когда частицы солнечного ветра сталкиваются с атмосферой Земли вблизи магнитных полюсов. Они особенно заметны в высоких широтах и часто сопровождают усиление солнечной активности.

Нерешённые задачи исследования солнечной атмосферы

01

Почему нагревается корона

Самая известная загадка состоит в том, что корона горячее фотосферы на порядки, хотя находится дальше от источника энергии. Учёные проверяют роль волн, пересоединения магнитных линий и мелких вспышек.

02

Как запускаются мощные выбросы

Не до конца ясно, какие именно изменения магнитного поля переводят активную область в режим вспышки или коронального выброса массы. Важны форма поля, его напряжённость и накопление энергии.

03

Что происходит на малых масштабах

Микровспышки, тонкие струи и короткие импульсы плазмы трудно наблюдать из-за их быстроты и малых размеров. Однако именно они могут вносить вклад в общий нагрев верхних слоёв атмосферы.

04

Как улучшить прогноз

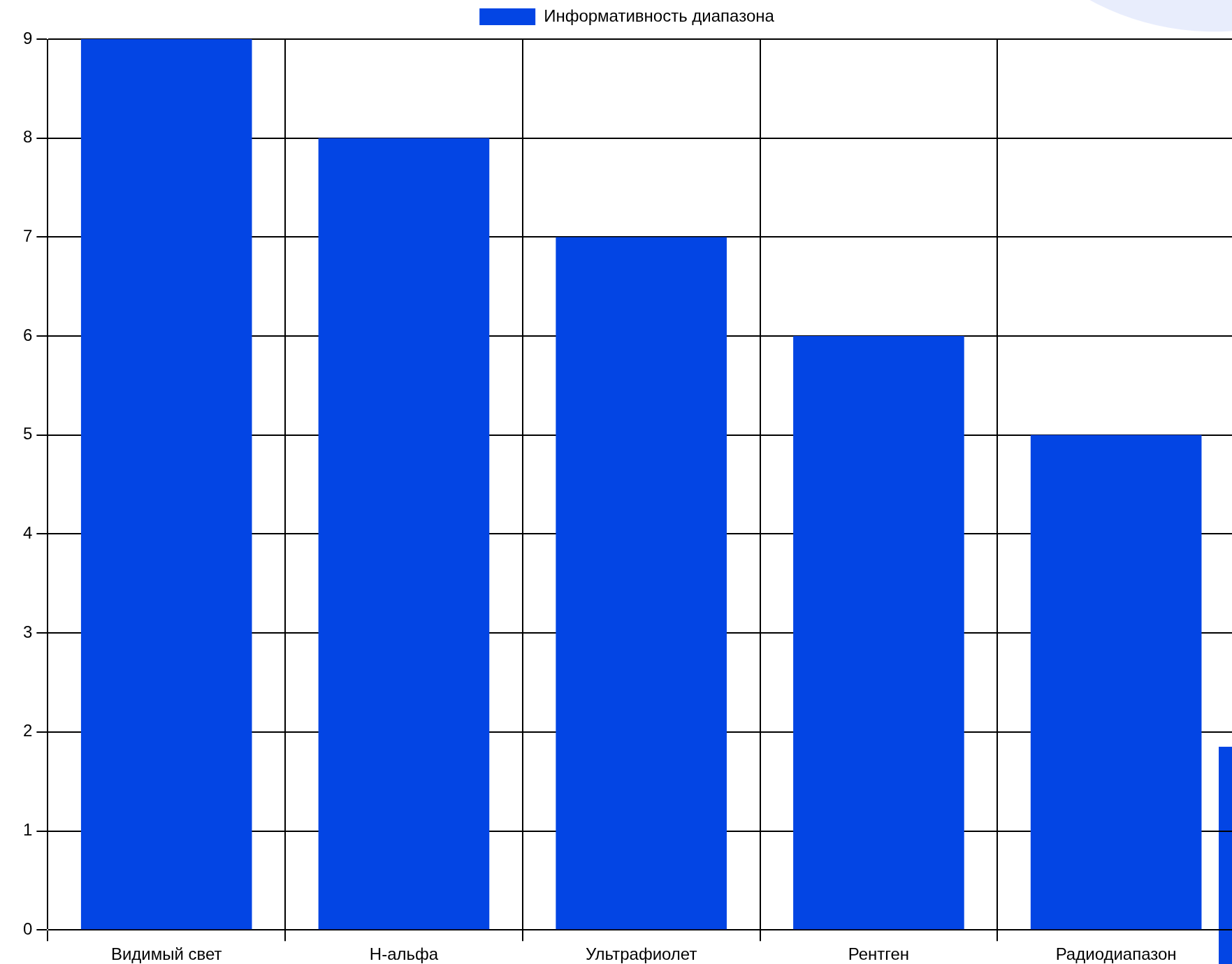
Лучшее понимание процессов в атмосфере Солнца позволит точнее предсказывать космическую погоду. Это важно не только для науки, но и для защиты спутников, связи и энергосистем.



Какие диапазоны излучения позволяют изучать разные слои атмосферы

Разные диапазоны дополняют друг друга: один и тот же слой Солнца раскрывается по-разному в зависимости от длины волны.

Чем короче длина волны, тем глубже видны горячие и энергичные процессы; для полной картины нужны сразу несколько диапазонов.



Обобщение наблюдательных возможностей спектральных диапазонов в солнечной физике.



Атмосфера Солнца: от спокойной поверхности к бурной короне

Три слоя солнечной атмосферы образуют единую систему, где магнитное поле управляет плазмой, а активные процессы отражаются и на Солнце, и на Земле.

