

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ГЕЛИОГЕОФИЗИКЕ

Г. А. Жеребцов

*Институт солнечно-земной
физики СО РАН*

Международная Байкальская молодежная
научная школа по фундаментальной физике
«Физические процессы в космосе и околоземной среде»

XVI Конференция молодых ученых
«Взаимодействие полей и излучения с веществом»
Иркутск, 16–21 сентября 2019 г.



Солнце – газовый, плазменный шар.

$R_{\odot}=6.96 \cdot 10^{10}$ см, т.е. в 109 раз больше R_{\oplus}

$M_{\odot}=1.99 \cdot 10^{33}$ г, т.е. в 330 000 раз больше M_{\oplus}

$M_{\odot}=99.866$ % массы Солнечной системы.



Средняя плотность солнечного вещества 1.41 г/см³, что составляет 0.256 средней плотности Земли (солнечное вещество содержит по массе >70 % водорода, >20 % гелия, ~ 2 % других элементов.

Вращение имеет дифференциальный характер: экваториальная зона вращается быстрее (14.4° за сутки), чем высокоширотные зоны ($\sim 10^{\circ}$ за сутки).

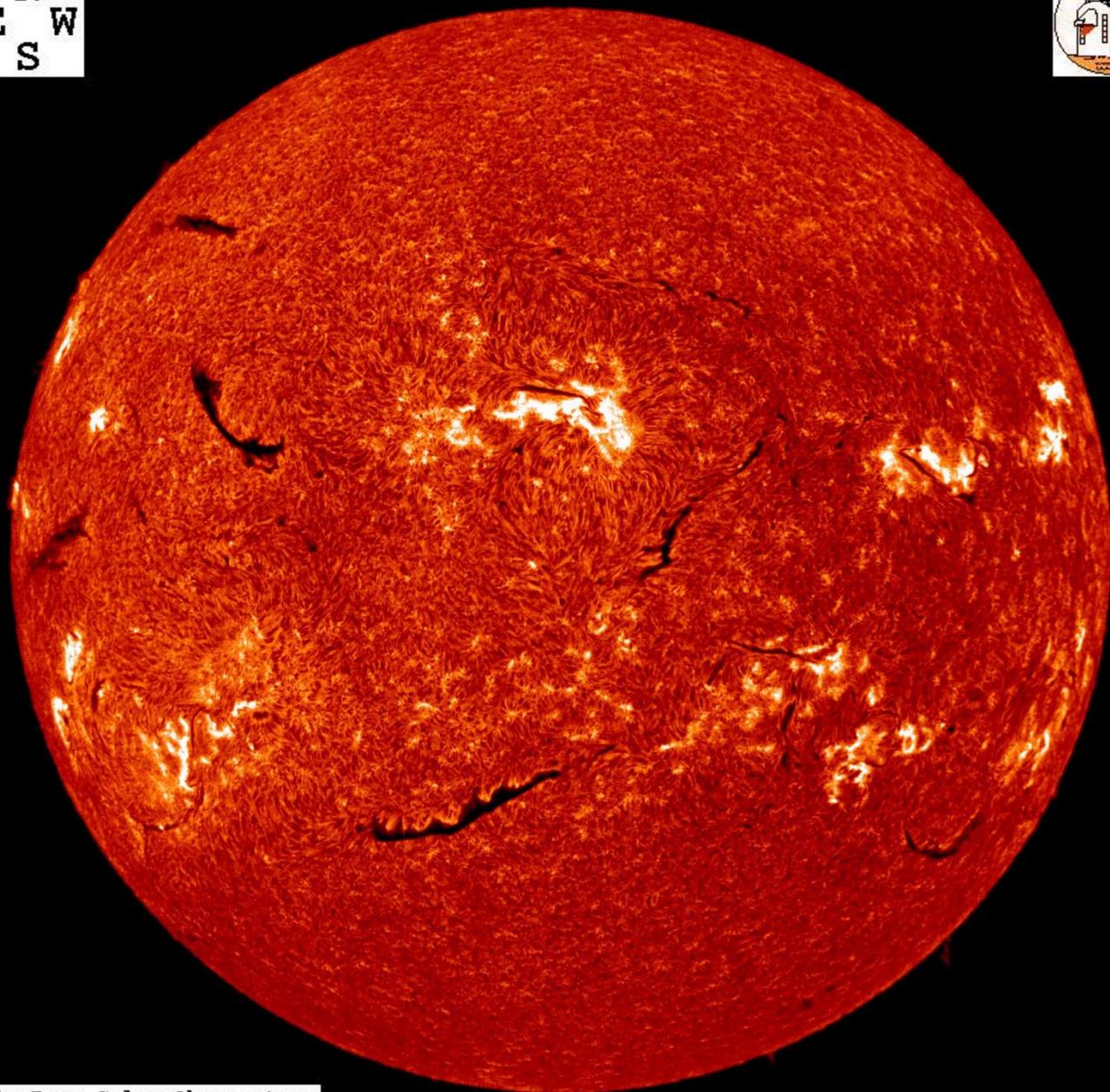
$T_{\odot} \sim 60000$ К (1 см² = 6 кВт).

T_{\odot} в центре $\sim 1.6 \cdot 10^7$ К за счет ядерных реакций синтеза гелия из водорода.

Фотон из центральной части Солнца выходит на поверхность за ~ 1 млн. лет из-за многократного поглощения и переизлучения (в 200 раз больший путь от Солнца до Земли свет проходит за ~ 8 мин).

Солнце – звезда-карлик, имеет 8 планет-спутников, суммарная масса которых ~ 0.13 % M_{\odot} , но на них приходится ~ 98 % момента количества движения всей солнечной системы.

N
E W
S



Big Bear Solar Observatory
2002-12-08 17:17:42 UT

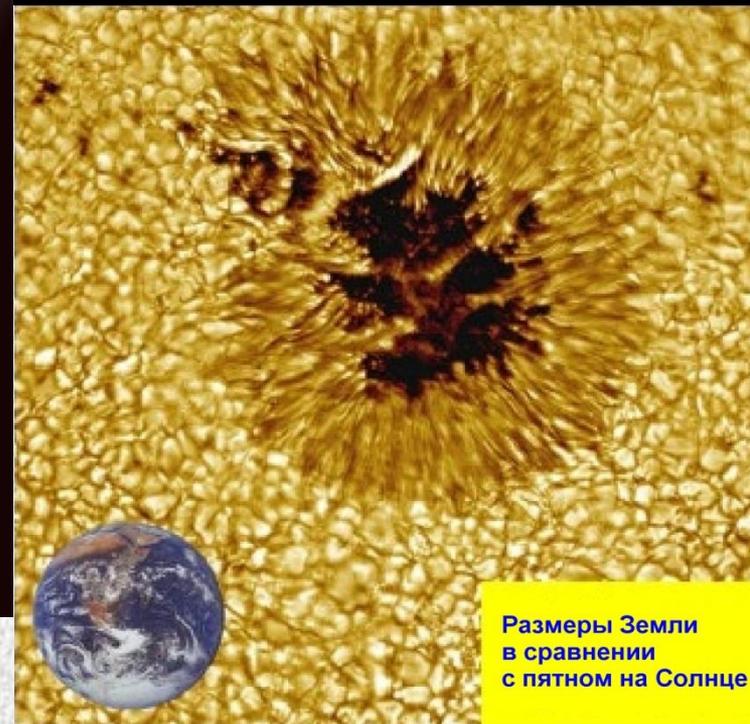
Солнце



Примерный размер Земли
для сравнения



Размеры Земли в сравнении с Солнцем



Размеры Земли
в сравнении
с пятном на Солнце

Протуберанец
(8–15)10³ К

Корональный
стример
1.5·10⁶ К

Фотосфера
(гранулы)
5760 К

Пятно
4·10³ К

Хромосфера
20·10³ К

Волокно

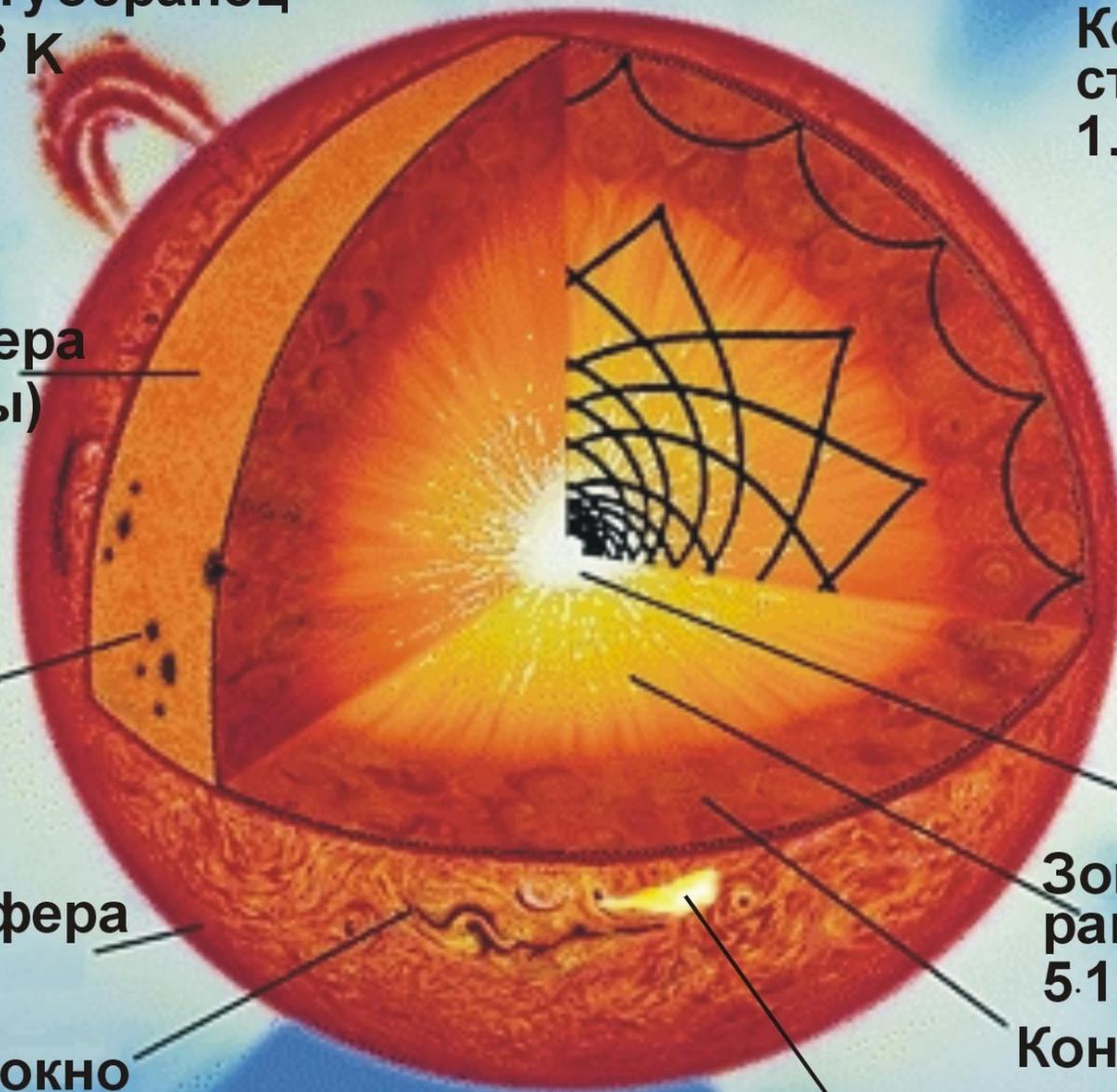
Корональная
дыра, 10⁶ К

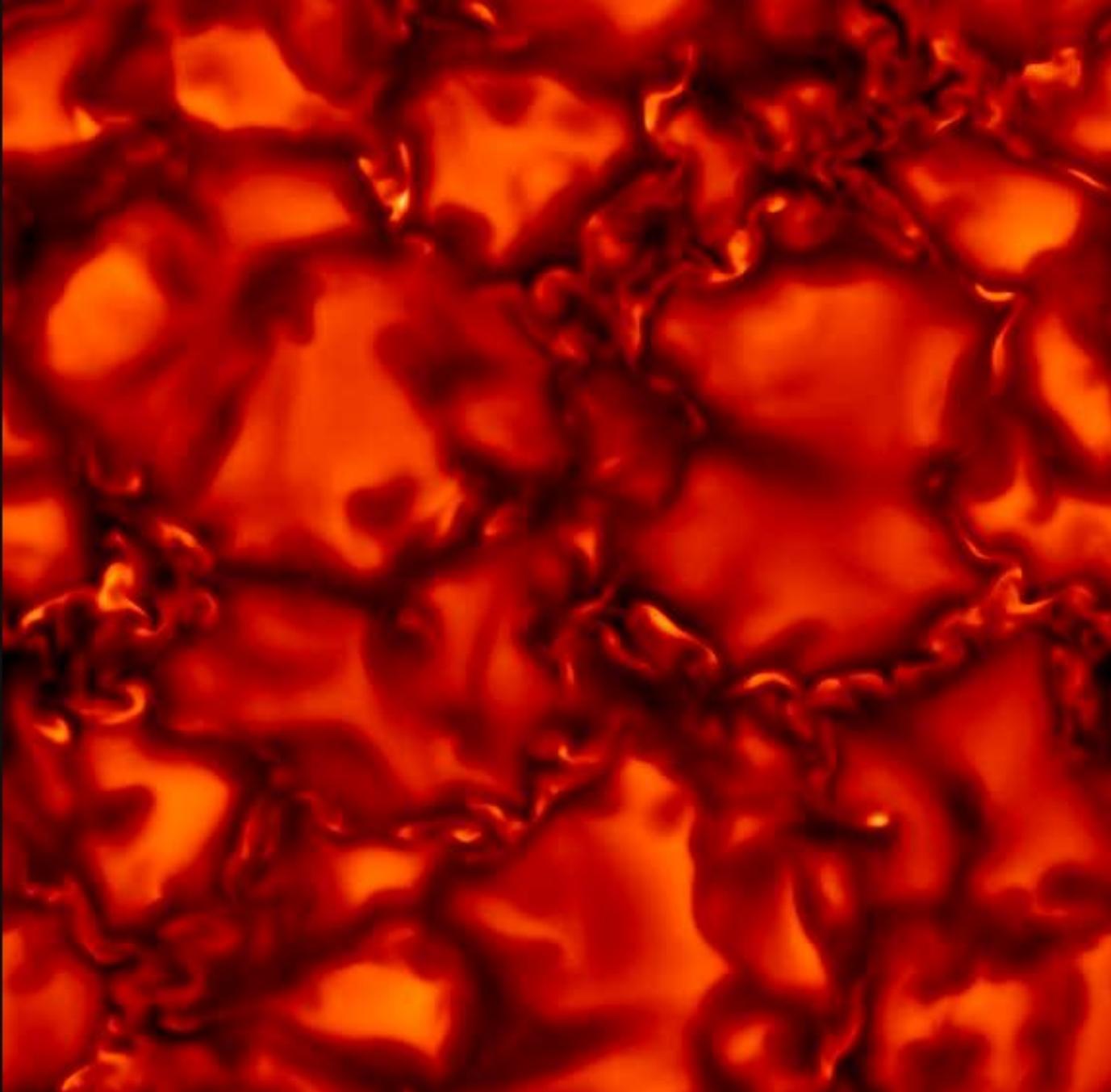
Вспышка
10·10⁶ К

Ядро
15·10⁶ К

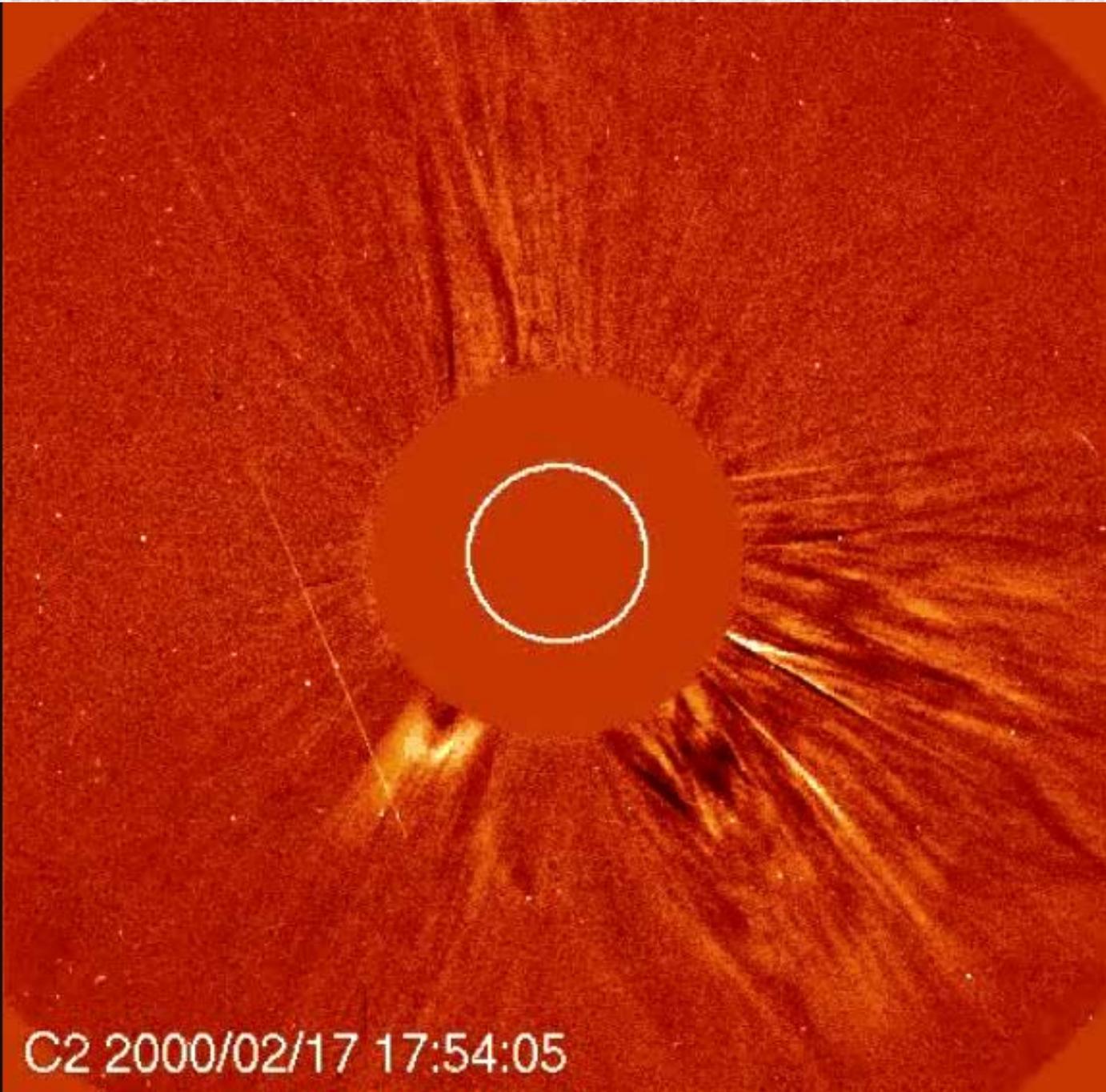
Зона лучистого
равновесия
5·10⁶ К

Конвективная
зона, 10⁵ К

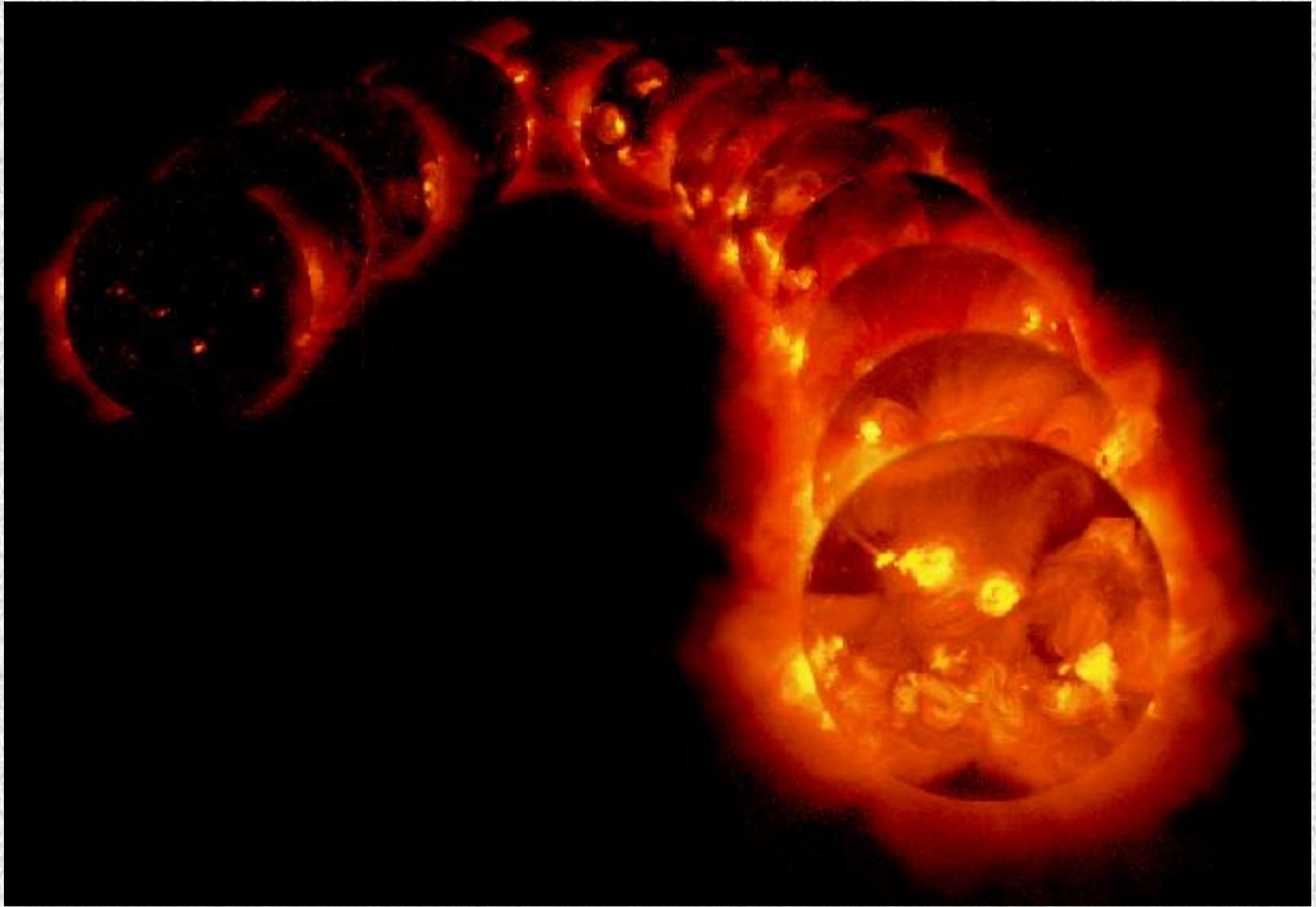








C2 2000/02/17 17:54:05

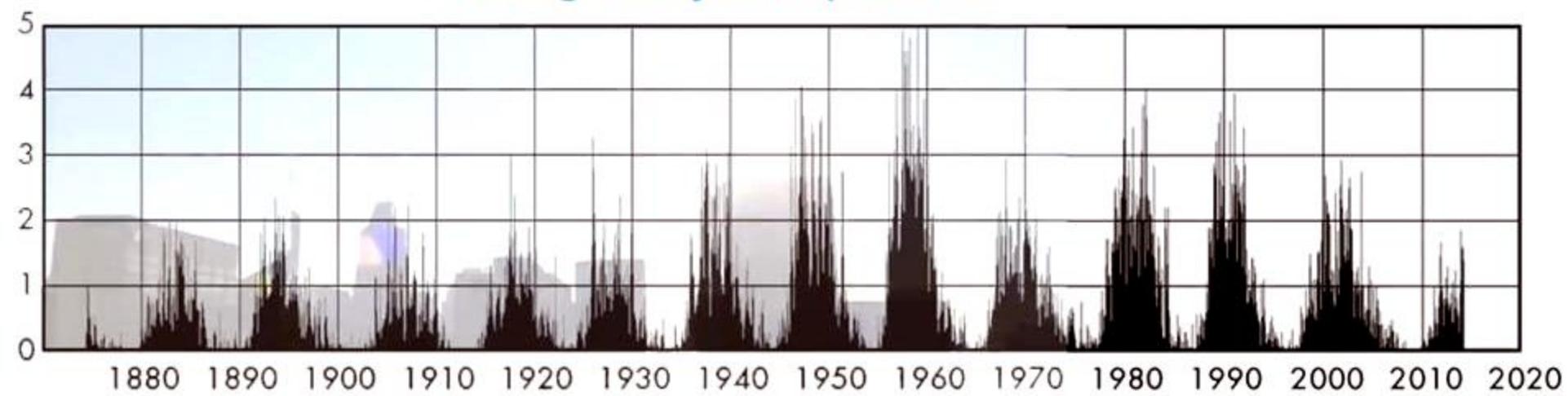


От минимума активности к максимуму

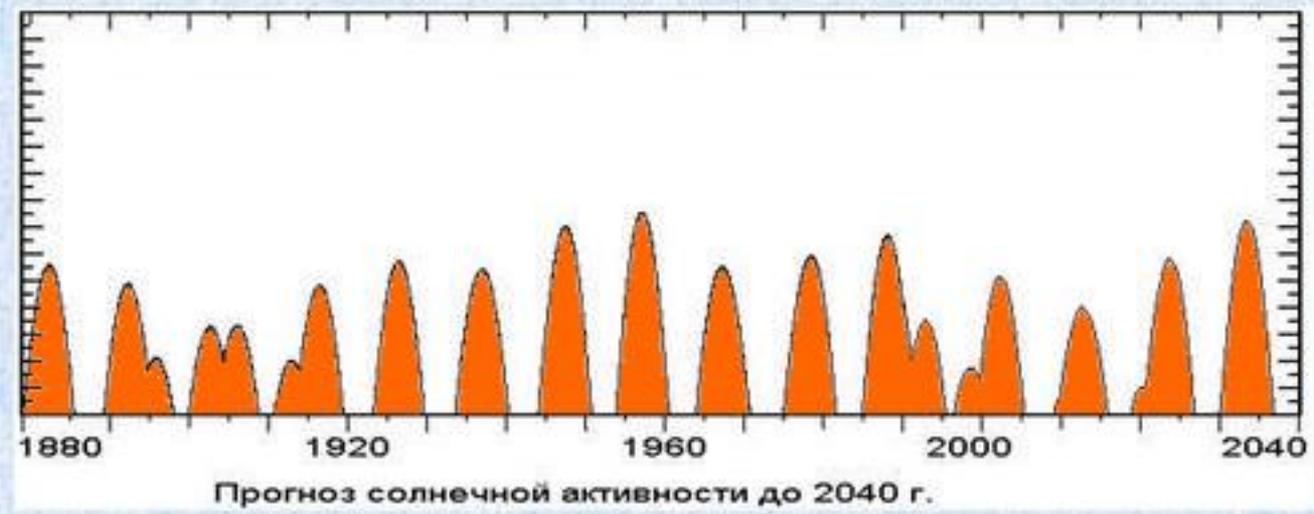


Числа Вольфа 1875–2015 г.

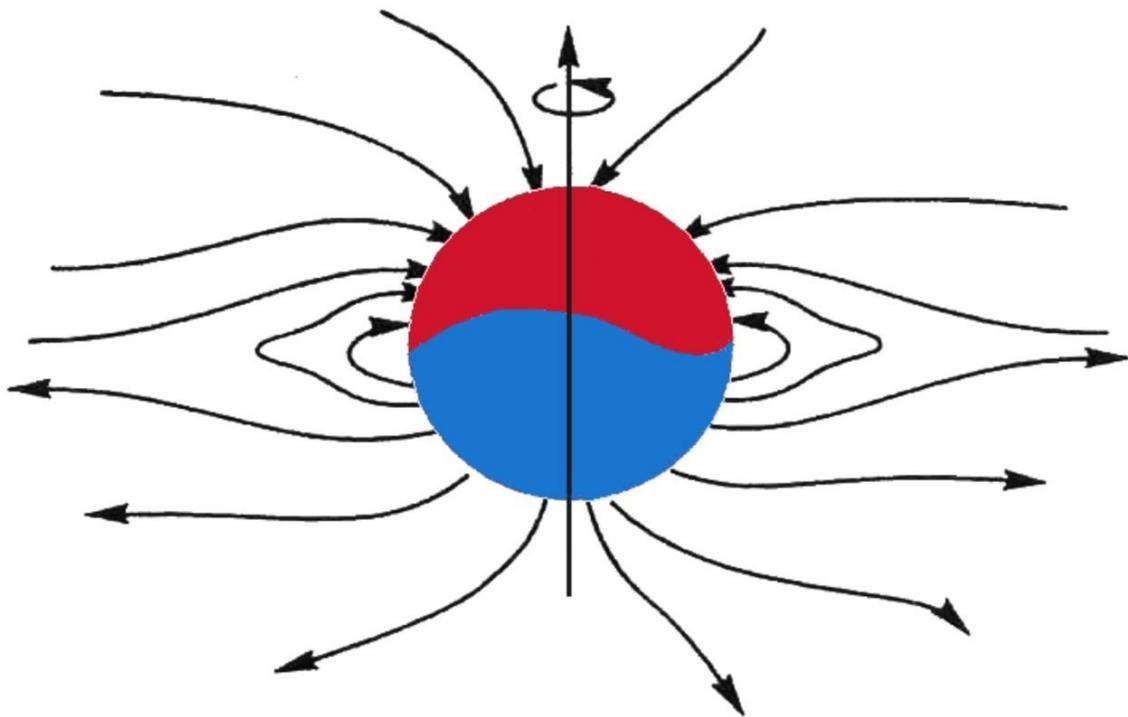
Average Daily Sunspot Area



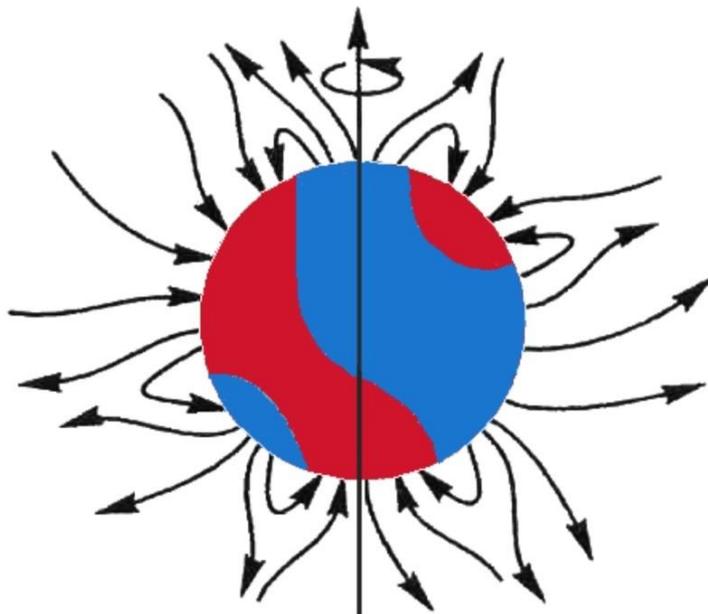
Прогноз солнечной активности, составленный в 2000 г.



Прогноз солнечной активности до 2040 г.

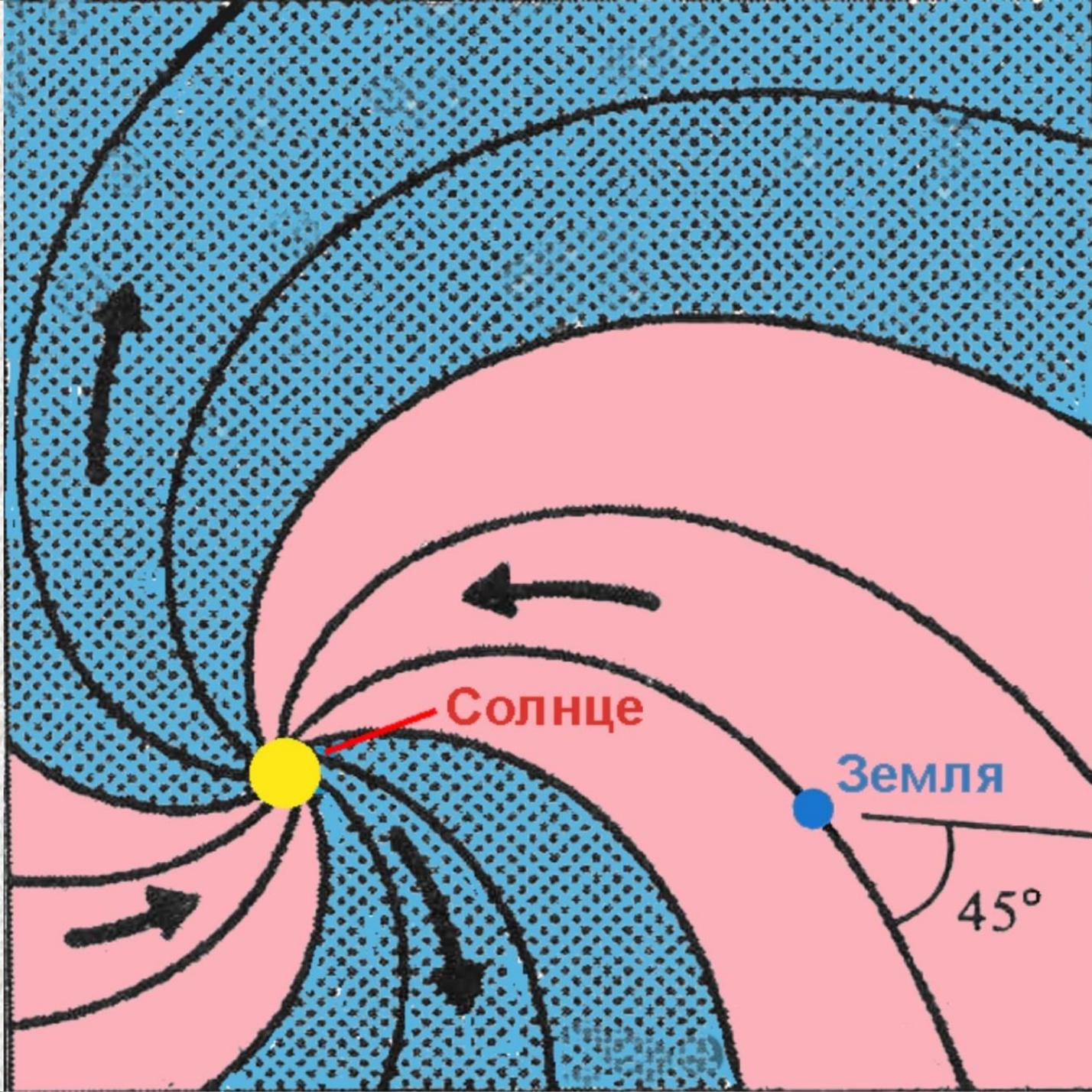


Минимум активности



Максимум активности

**Структура крупномасштабного
магнитного поля Солнца**





Гелиосферный токовый слой

Магнитосфера Земли – результат воздействия солнечного ветра на магнитное поле Земли

авроральная зона

ударная волна

солнечный ветер

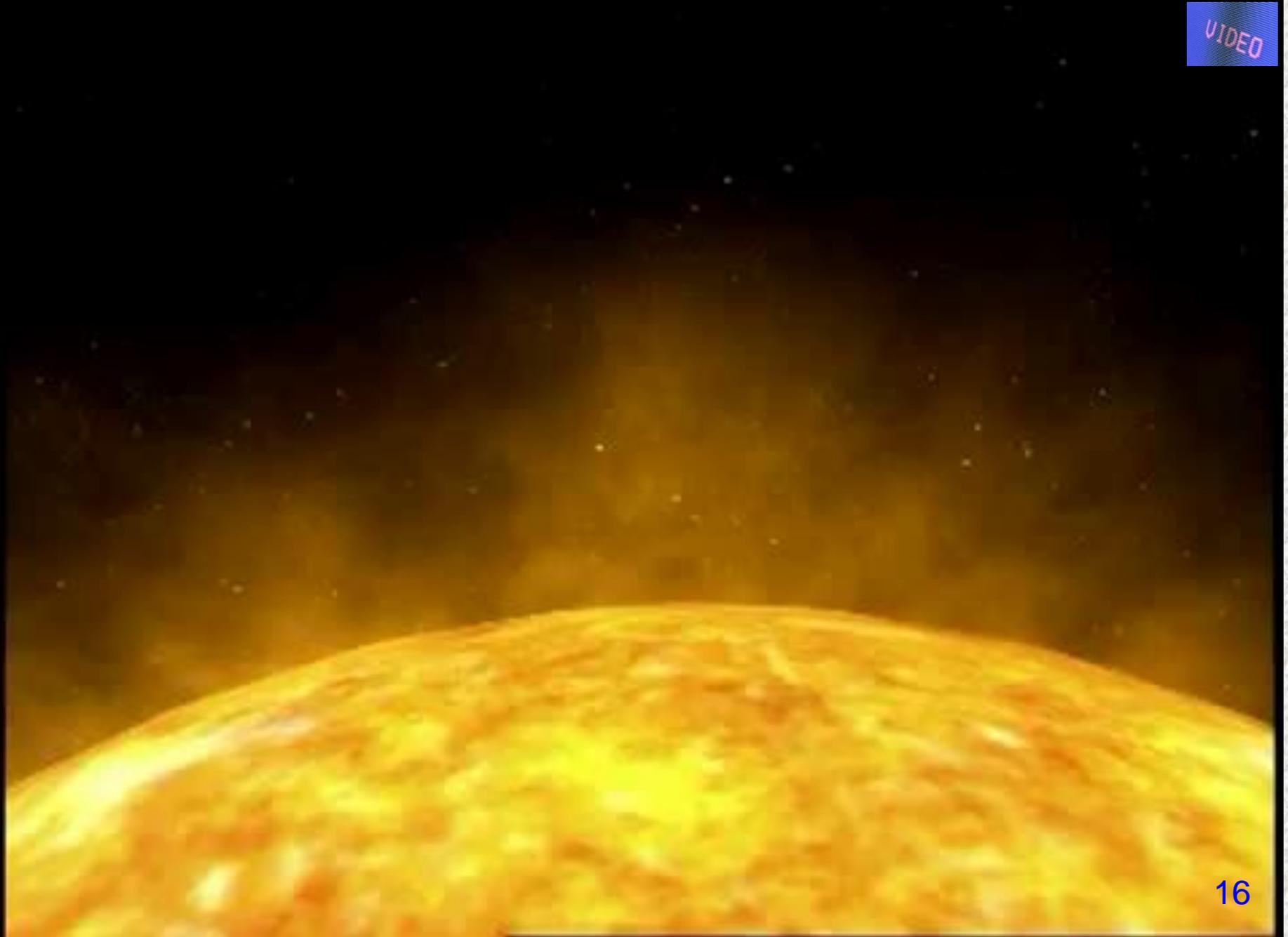
магнитные
силовые
линии

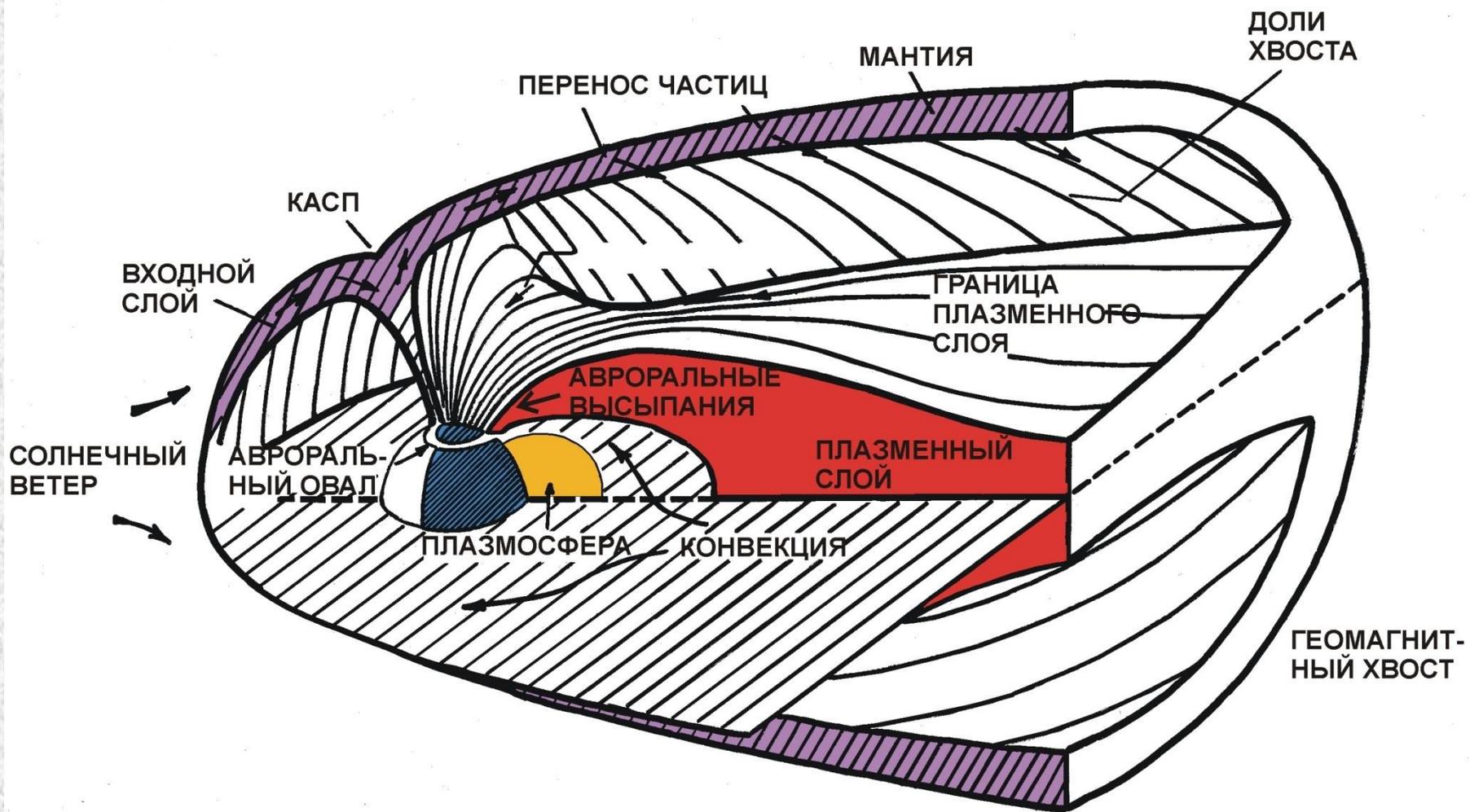
полярный касп

магнитопауза

Структура магнитосферы Земли



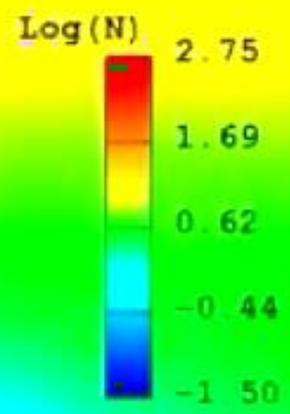




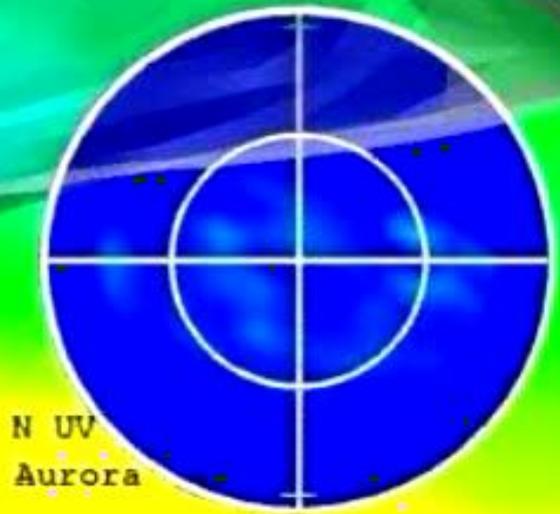
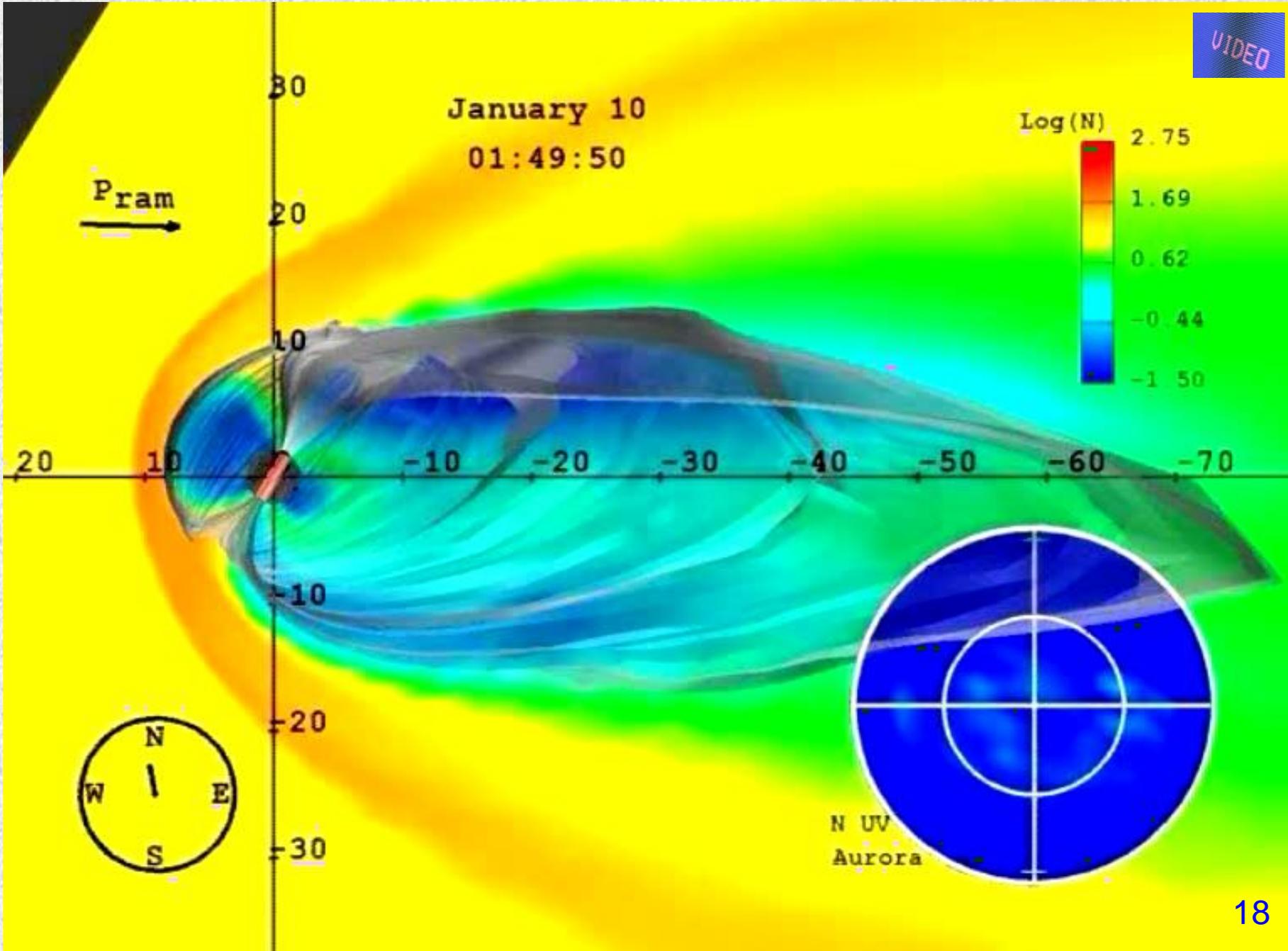
**Схема магнитосферы Земли
 (меридиональный разрез)**

VIDEO

January 10
01:49:50

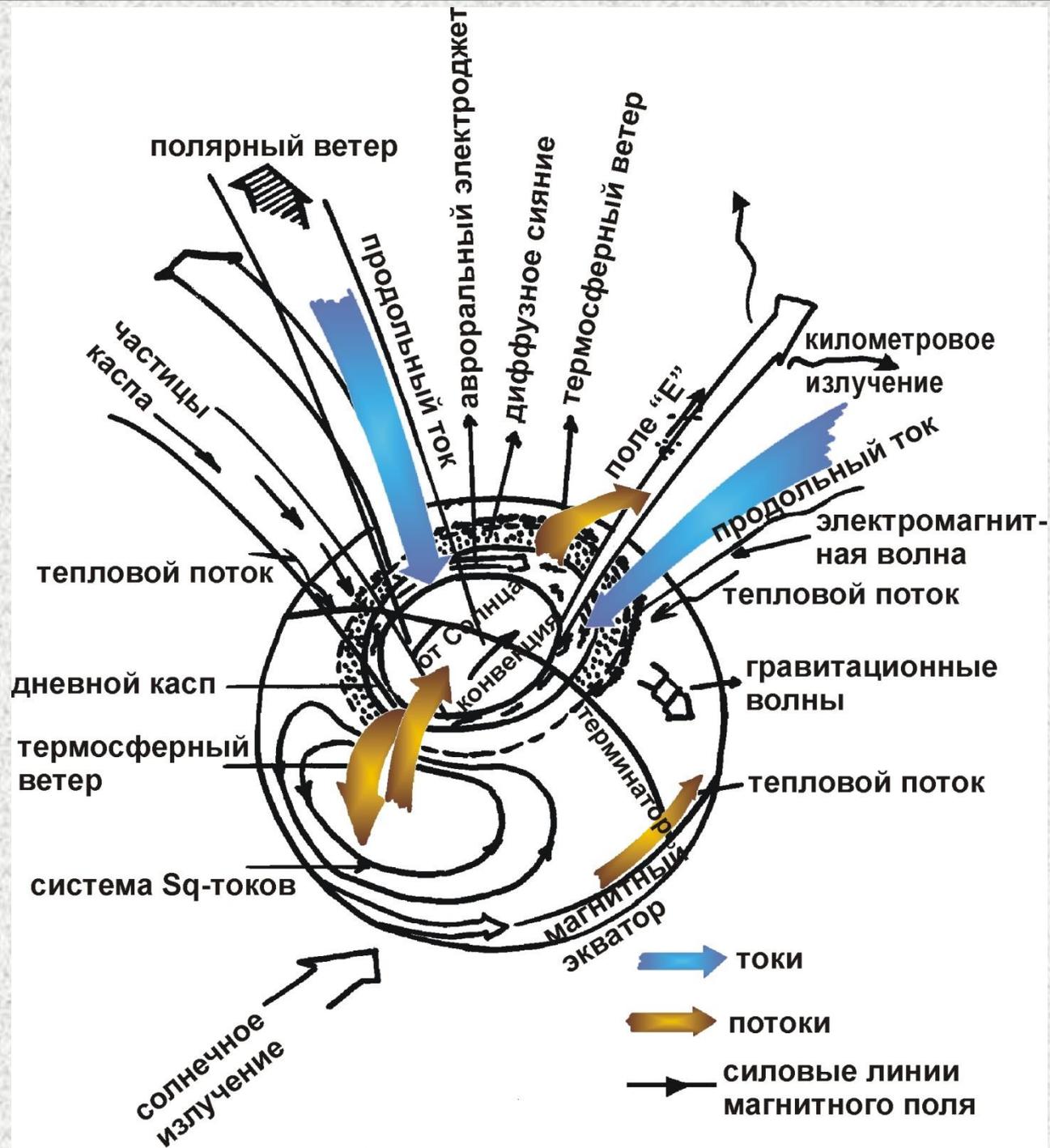


Pram
→



Факторы, определяющие солнечно-земные связи (солнечное воздействие)

- 1. Коротковолновое солнечное УФ- и рентгеновское излучение.**
- 2. Солнечные космические лучи (СКЛ).**
- 3. Солнечный ветер и межпланетное магнитное поле.**
- 4. Галактические космические лучи (ГКЛ) – влияние межзвездной среды.**



Выводы о солнечных явлениях как факторах космической погоды

Причины изменения космической погоды (или гелиогеофизической обстановки в межпланетной среде и ОКП) — солнечные явления:

1. Корональные выбросы массы (КВМ);
2. Солнечные вспышки;
3. Всплески солнечных космических лучей (СКЛ);
4. Солнечный ветер (СВ).

Эти события могут происходить в различных областях на поверхности Солнца, **но только при определенных условиях могут вызвать события космической погоды в ОКП и на Земле.**

Понимание явлений солнечной бури имеет принципиальное значение для расчетов точных прогнозов космической погоды (начало события, местоположение, продолжительность и др.).

Корональные выбросы массы (КВМ) — выброс плазмы (заряженных частиц) из солнечной короны достигает Земли за 2–3 дня (во время сильнейших бурь — за 15 часов).

КВМ, взаимодействуя с магнитным полем Земли, вызывает явления космической погоды — геомагнитную бурю (изменения в ионосфере, изменения геомагнитного поля, полярные сияния и др.).

Солнечная вспышка порождает выброс интенсивного электромагнитного излучения высокой энергии с поверхности Солнца, связанный с солнечными пятнами. Электромагнитное излучение от вспышки достигает Земли примерно через 8 минут, а явления, связанные со вспышками, имеют продолжительность 1–3 часа на дневной стороне Земли (снижают качество и нарушают работу спутниковой связи, радаров и систем радиосвязи).

Всплеск солнечных космических лучей — выбросы энергичных электронов, протонов альфа-частиц и других более тяжелых частиц в межпланетное пространство. Эти частицы достигают Земли примерно за 10 минут и вызывают временное повышение уровня радиационного излучения в межпланетном и околоземном пространстве. Энергичные протоны воздействуют на людей в космосе, представляют риск для людей, находящихся на борту воздушных судов в высоких широтах, разрушают ДНК, наносят вред электронике космических аппаратов, усложняют и блокируют радиосвязь.

Солнечный ветер (СВ) — непрерывное истечение солнечного вещества от Солнца. Разные области Солнца создают потоки СВ с разными скоростями и плотностями. Эти потоки играют важную роль в космической погоде — высокоскоростные потоки СВ могут вызвать геомагнитные возмущения, медленные — нет. Эффективность воздействия СВ на Землю (т. е. фактор космической погоды) сильно зависит от скорости СВ, его плотности и направления V_z -компоненты ММП.

Задачи мониторинга гелиогеофизической среды

1. Проведение непрерывных длительных наблюдений многих разнородных геофизических параметров на сети наблюдательных пунктов. Система размещения на территории РФ должна быть научно обоснованной в интересах всех пользователей.
2. Хранение и обработка большого объема научно-технической информации. Обработанная и хранящаяся информация разного типа должна эффективно использоваться
 - а) для оперативного заключения о состоянии среды и выдачи прогноза;
 - б) для использования в фундаментальных исследованиях;
 - в) для разработки стандартов явлений космической погоды.
3. Создание адекватных моделей среды для разработки прогноза явлений космической погоды.

В целях улучшения понимания, прогнозирования и готовности к событиям космической погоды (самим явлениям и их последствиям) в программе США прописаны шесть целей.

Программа предусматривает готовность США к краткосрочным и долгосрочным воздействиям космической погоды:

1. Установление стандартов космической погоды;
2. Повышение способности оперативного реагирования и восстановления;
3. Повышение эффективности мероприятий по защите от последствий экстремальных событий космической погоды и по минимизации их негативного воздействия на окружающую среду;
4. Повышение эффективности оценки, моделирования и прогнозирования неблагоприятного воздействия космической погоды на важные объекты инфраструктуры;
5. Повышение эффективности работы служб мониторинга космической погоды;
6. Укрепление международного сотрудничества.

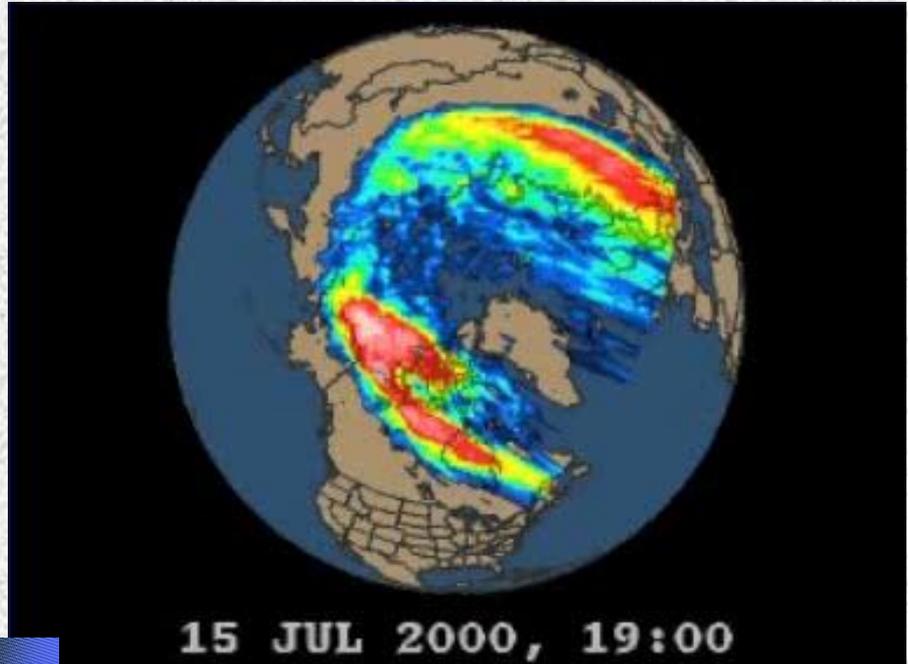
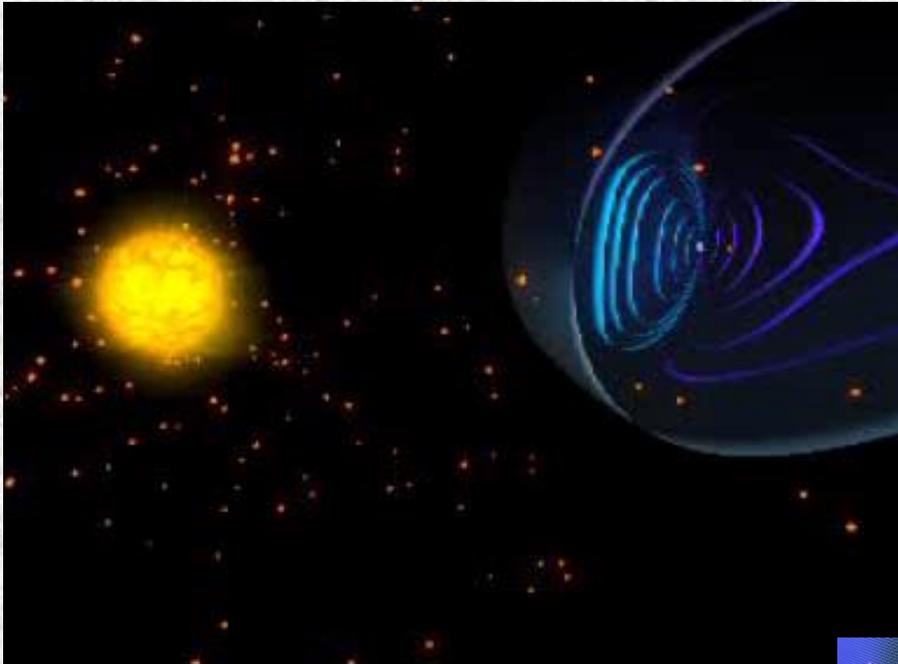
Эффекты космической погоды

- 1. Воздействие космической радиации на аппаратуру космических аппаратов и самолетов; радиационная угроза для космонавтов и экипажей высотных самолетов.**
- 2. Изменение условий распространения радиоволн и помехи в системах связи и навигации.**
- 3. Изменение орбит спутников из-за нагрева верхней атмосферы.**
- 4. Геоиндуцированные (паразитные) токи в протяженных проводящих объектах и системах: трубопроводах, кабелях, линиях электропередач и связи, на железных дорогах в приполярных широтах.**
- 5. Модификация химического состава и свойства атмосферы Земли.**
- 6. Воздействие на биологические объекты и человека.**



VIDEO

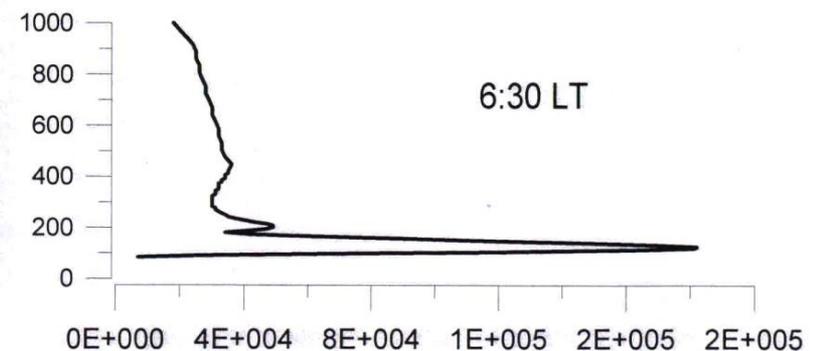
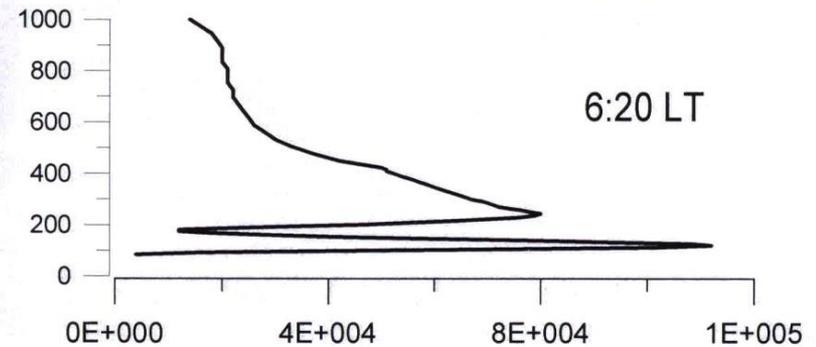
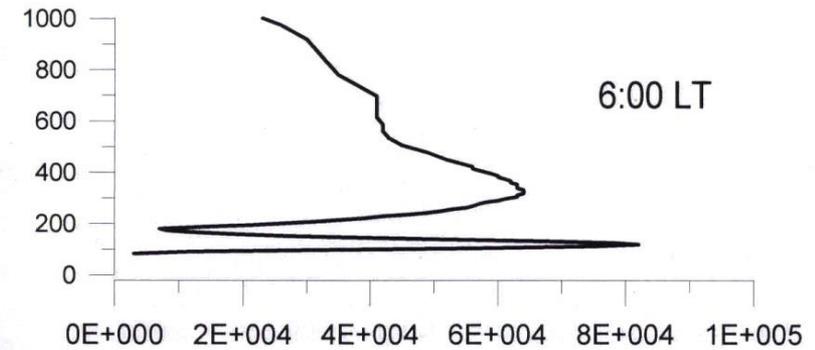
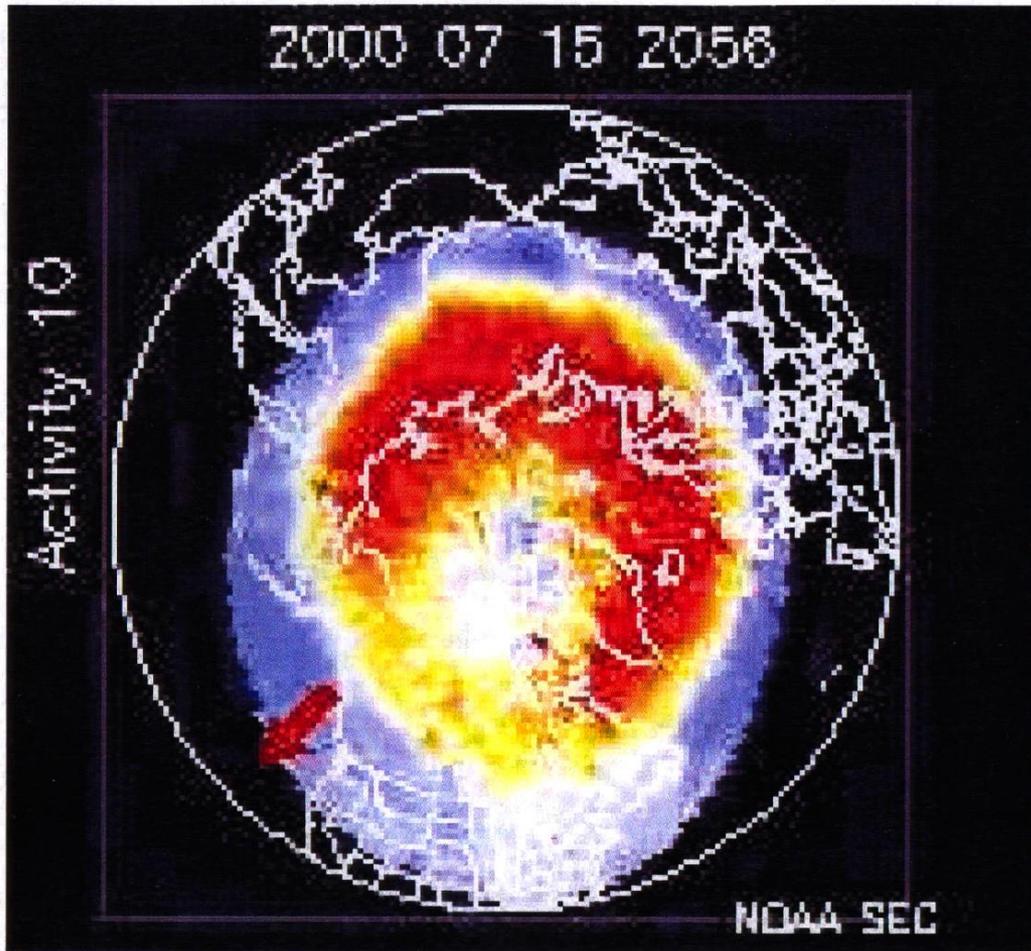




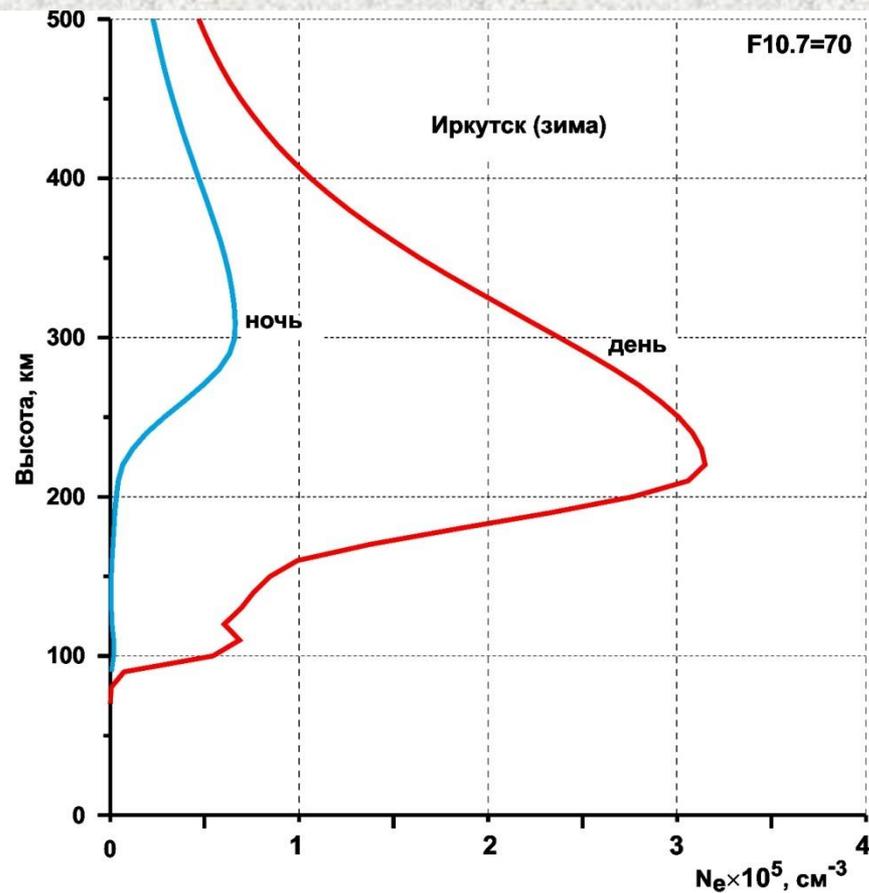
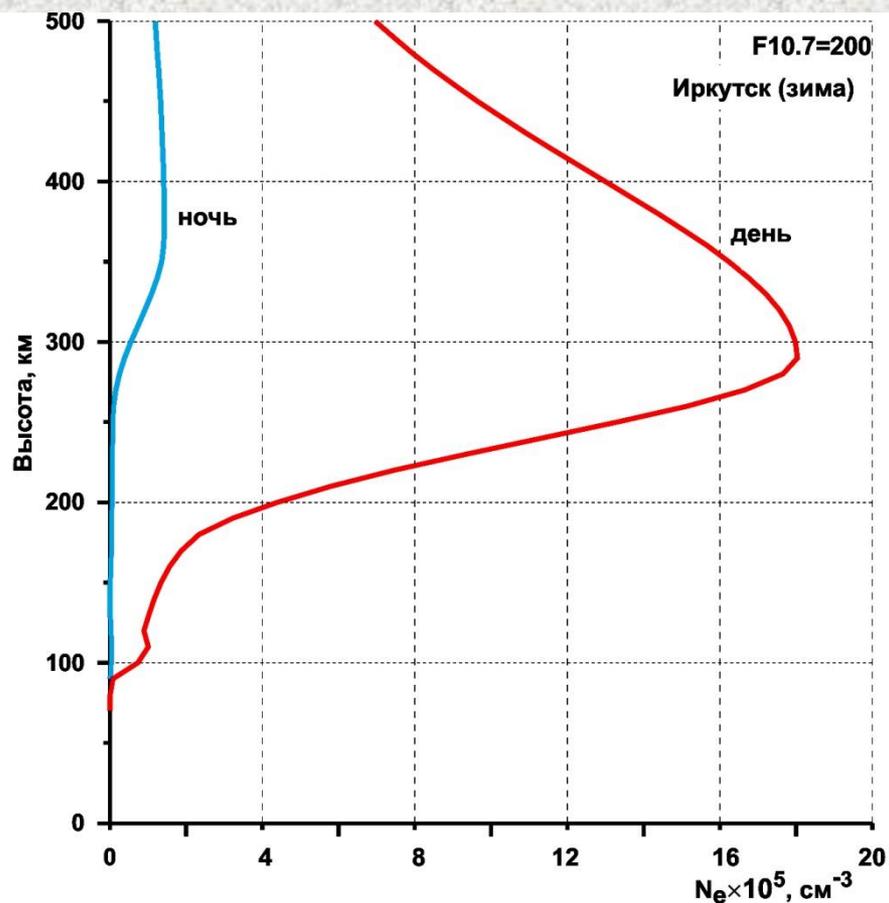
VIDEO

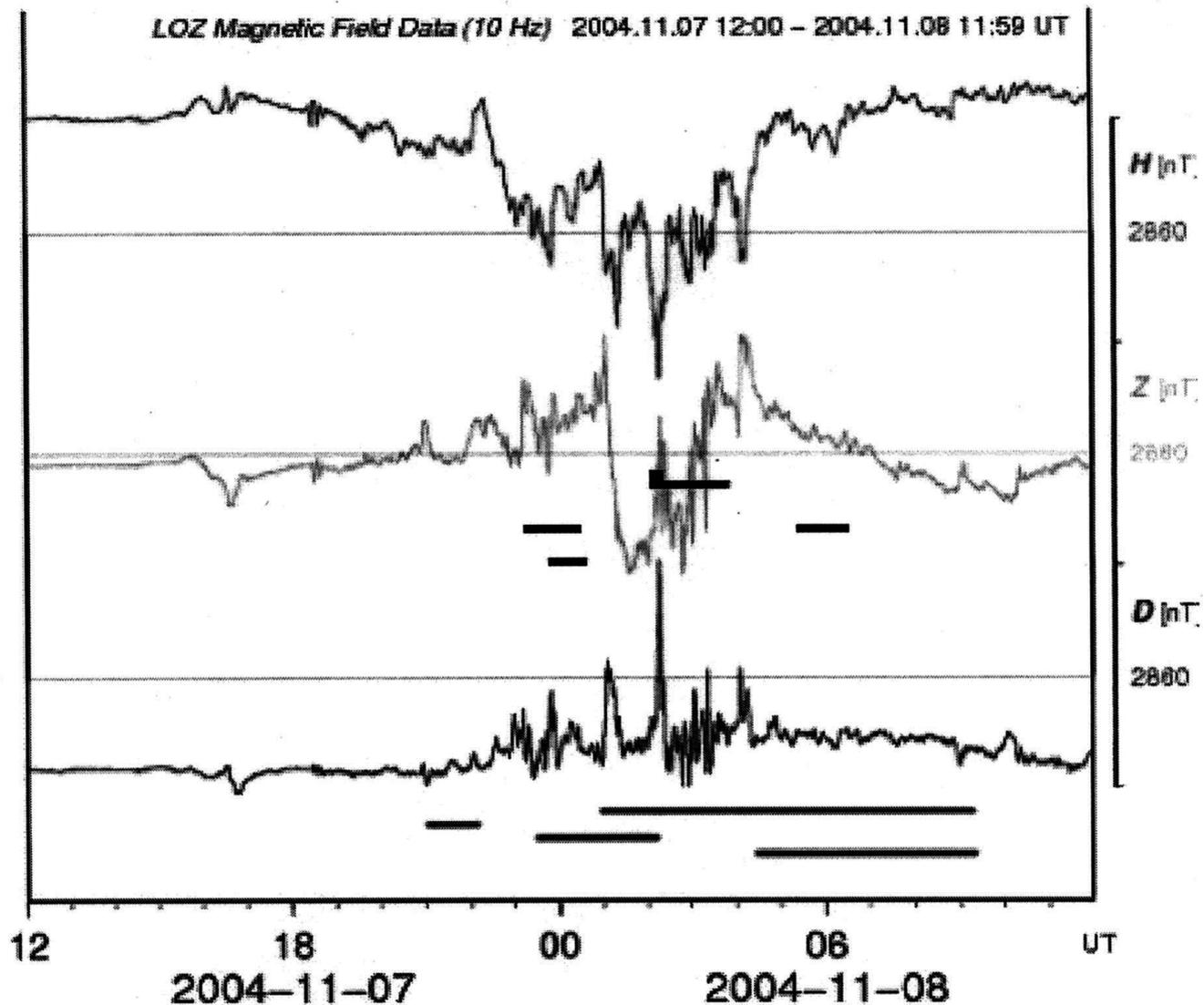


Вид полярного сияния и профили электронной концентрации



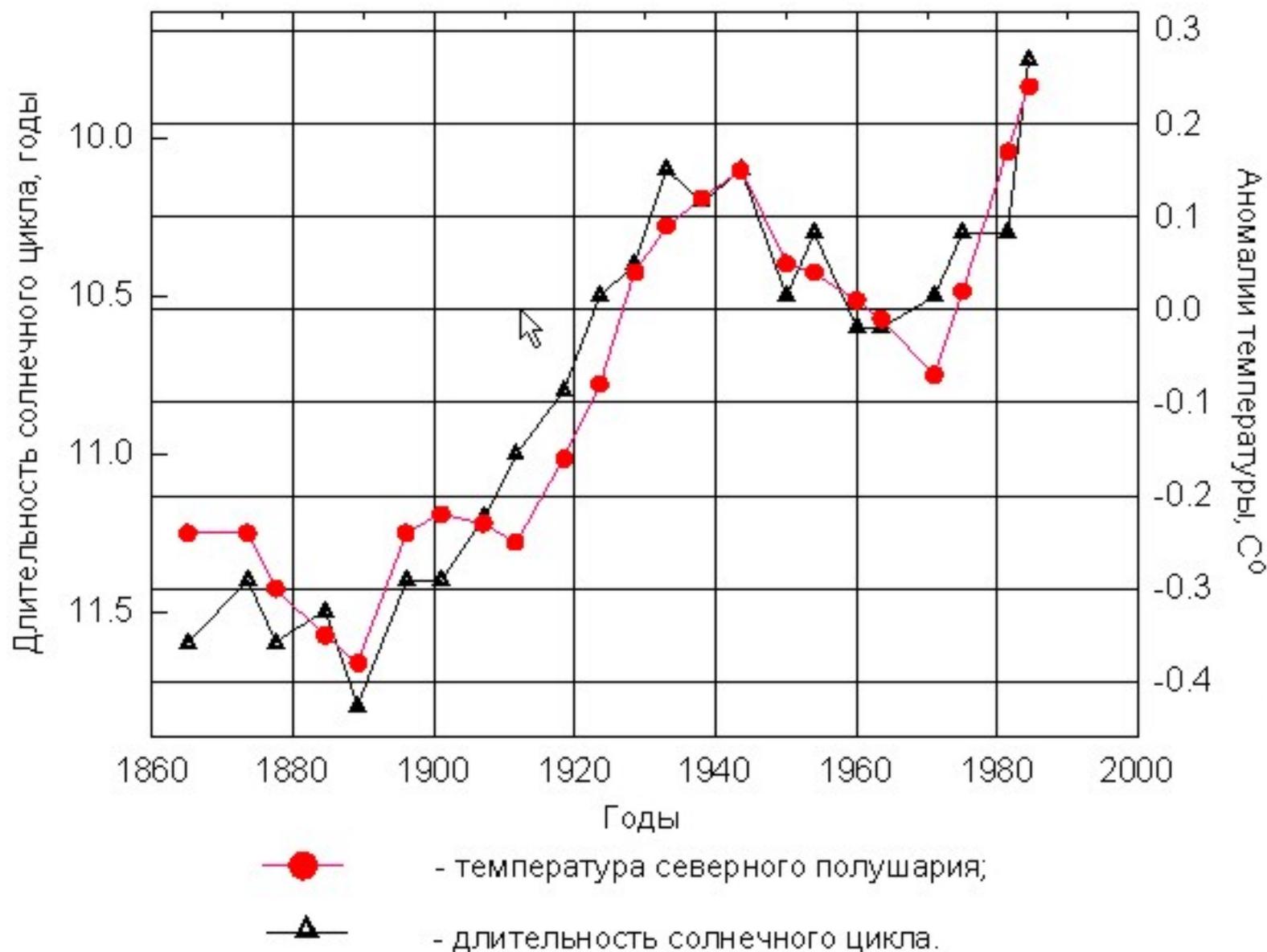
Профили электронной концентрации в ионосфере для высокой и низкой солнечной активности





**Событие 07.11.2004. Магнитограмма Ловозеро (вверху).
Черные полосы – сбои в работе железнодорожной автоматики 31
на Северной (в центре) и на Октябрьской (внизу) железных дорогах**

Сравнение температуры Северного полушария с длительностью солнечных циклов



Комплекс создается на базе обсерваторий ИСЗФ СО РАН, оснащенных большим набором инструментов, в том числе уникальных



**Проект «Национальный гелиогеофизический комплекс РАН»
состоит из взаимосвязанных субпроектов (инструментов):**

В области физики Солнца:

крупный солнечный телескоп-корonoграф; многоволновый радиогелиограф;

В области физики околоземного космоса:

радиофизический комплекс;
лидарно-оптический комплекс;
цепочка станций Норильск–Иркутск, арктическая сеть когерентных ВЧ-радаров.

Создаваемый комплекс и инструменты ИСЗФ СО РАН будут объединены в единый федеральный центр исследований и разработок в области физики околоземного космического пространства на основе программно-целевого подхода.

Научный продукт полного инновационного цикла НГК РАН – мониторинг и прогноз состояния околоземного космического пространства (ОКП)



Многоволновый радиогелиограф 3–24 ГГц



Мезосферно-стратосферно-тропосферный радар некогерентного рассеяния



Комплекс оптических инструментов



Крупный солнечный телескоп-коронаграф с диаметром зеркала 3 м

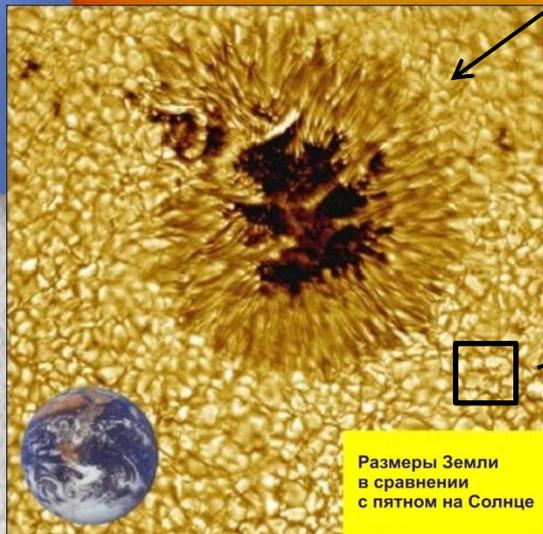
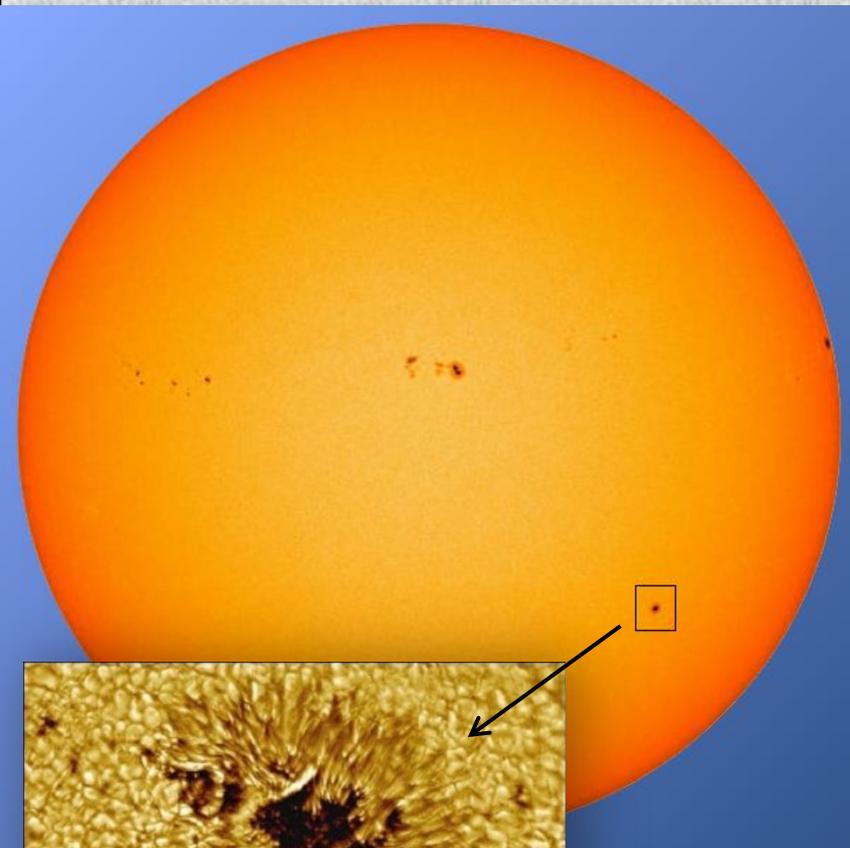


Мезосферно-стратосферный лидар

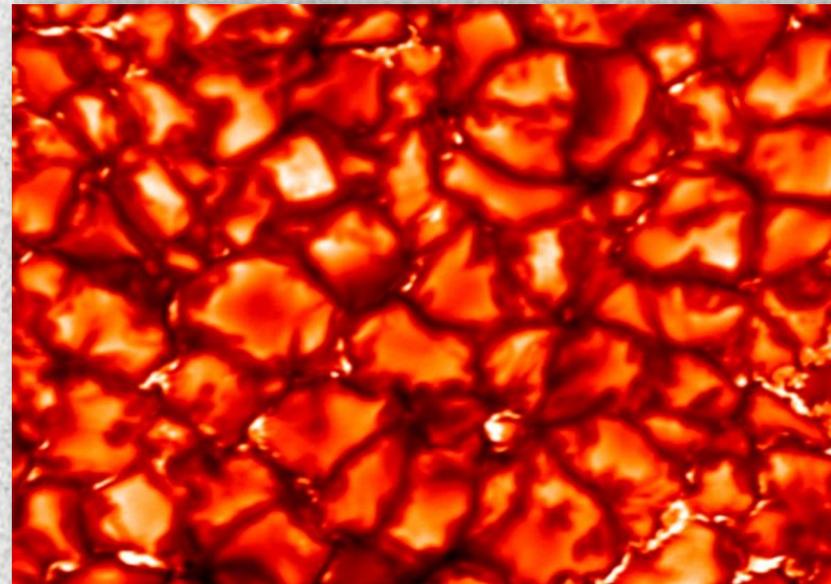
Крупный солнечный телескоп-коронаограф с диаметром зеркала 3 м

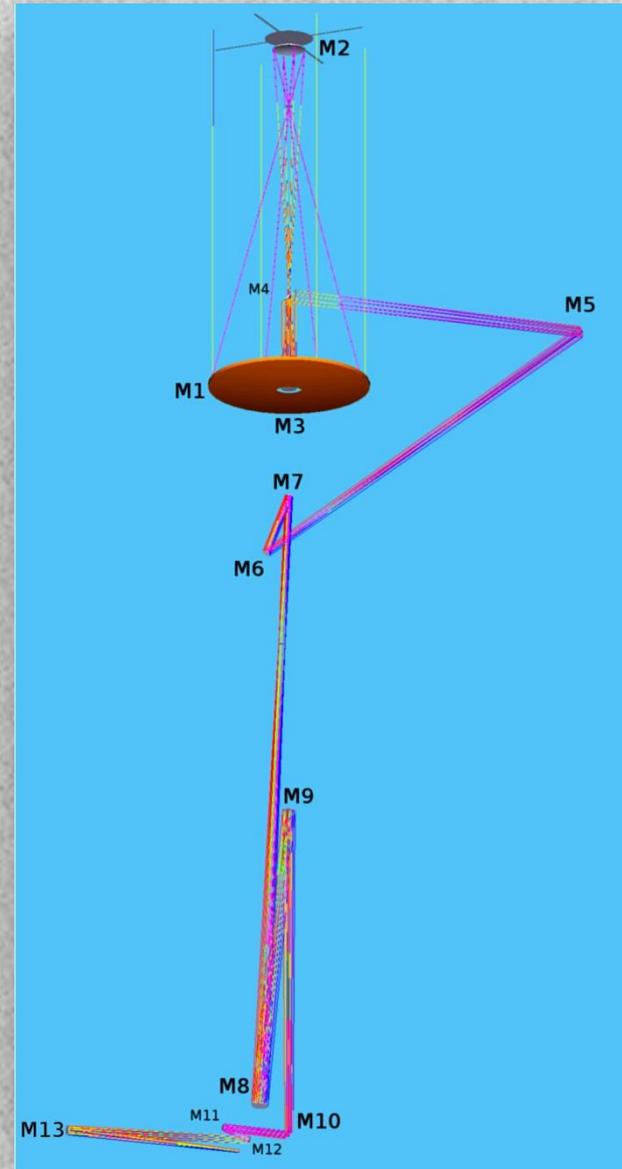
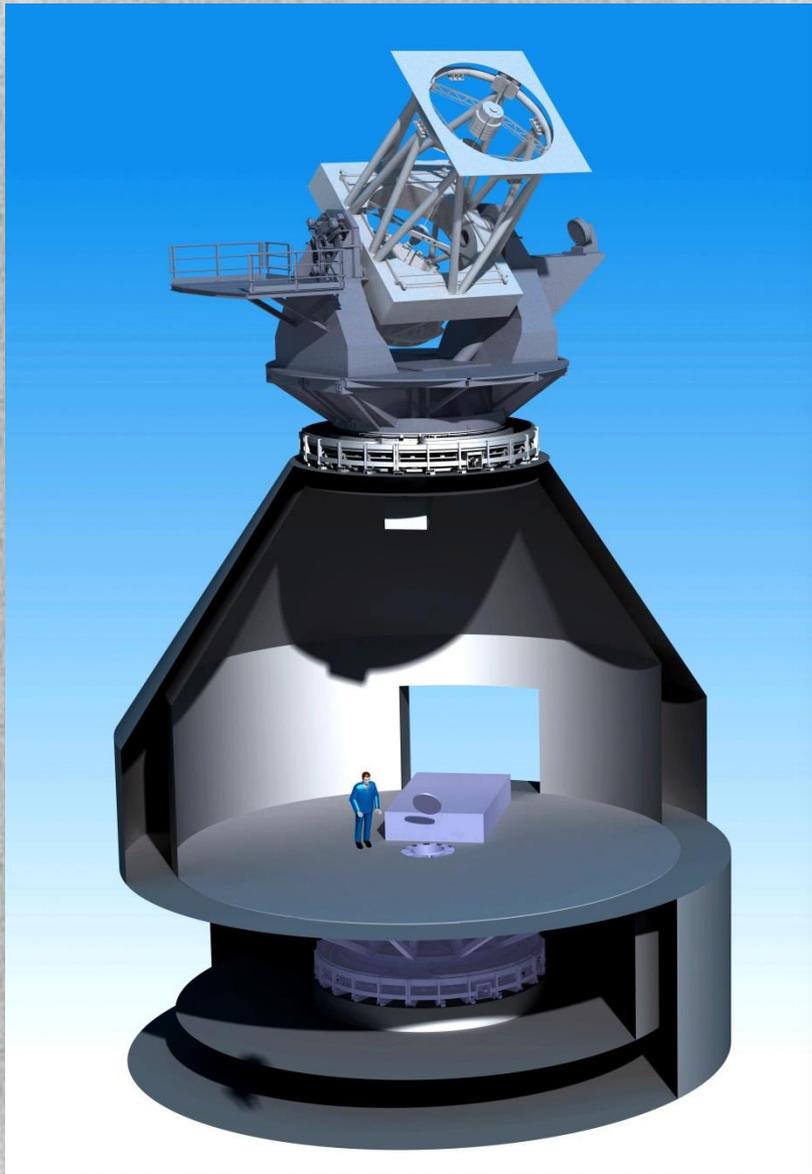
Основные научные задачи:

- Исследование строения солнечной атмосферы с недостижимым прежде пространственным, временным и спектральным разрешением;
- Исследование природы солнечного магнетизма и цикличности активности;
- Исследование процессов энерговыделения во вспышечных и других динамических явлениях;
- Мониторинг солнечных процессов и разработка прогноза солнечной активности.



Размеры Земли
в сравнении
с пятном на Солнце





Общий вид телескопа КСТ-3 (слева) и его оптическая схема



Предполагаемый вид телескопа КСТ-3 с технологическим корпусом в Саянской обсерватории



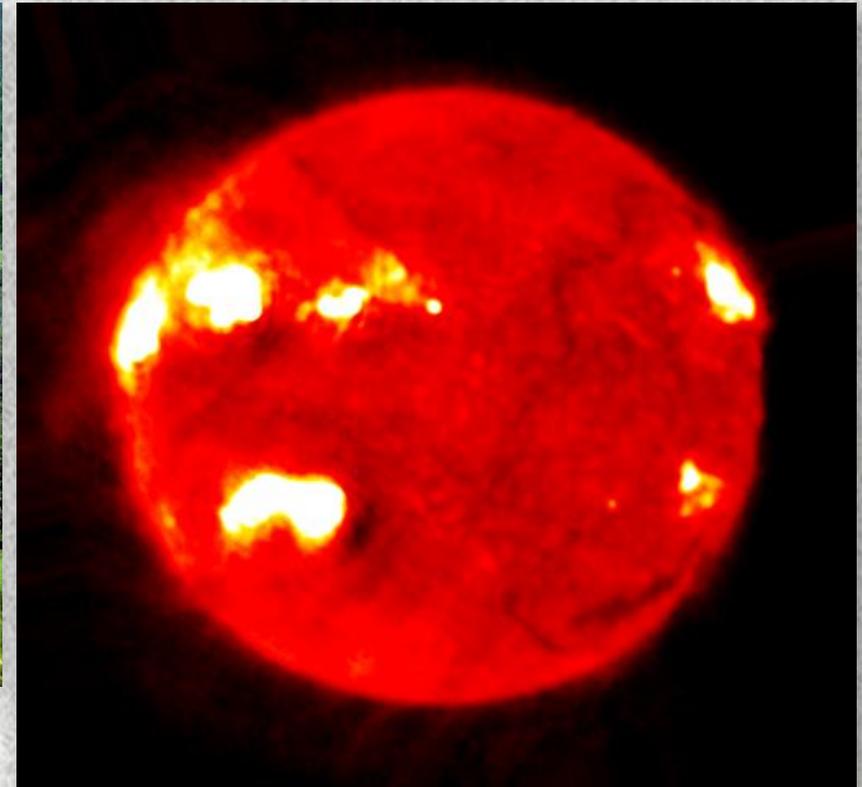


Зарубежный аналог КСТ-3 – Европейский солнечный телескоп (EST)
с диаметром зеркала 4 м

Многоволновый радиогелиограф на диапазон частот 3–24 ГГц



Создается на базе крупнейшего радиointерферометра России – 256-антенного Сибирского солнечного радиотелескопа, работающего на частоте 5.7 ГГц



Изображение Солнца на частоте излучения 5.7 ГГц: яркие области – места выхода сильных магнитных полей, в атмосфере которых образуются солнечные вспышки и выбросы корональной массы, возмущающие околоземную среду.

Радиогелиограф 3–24 ГГц

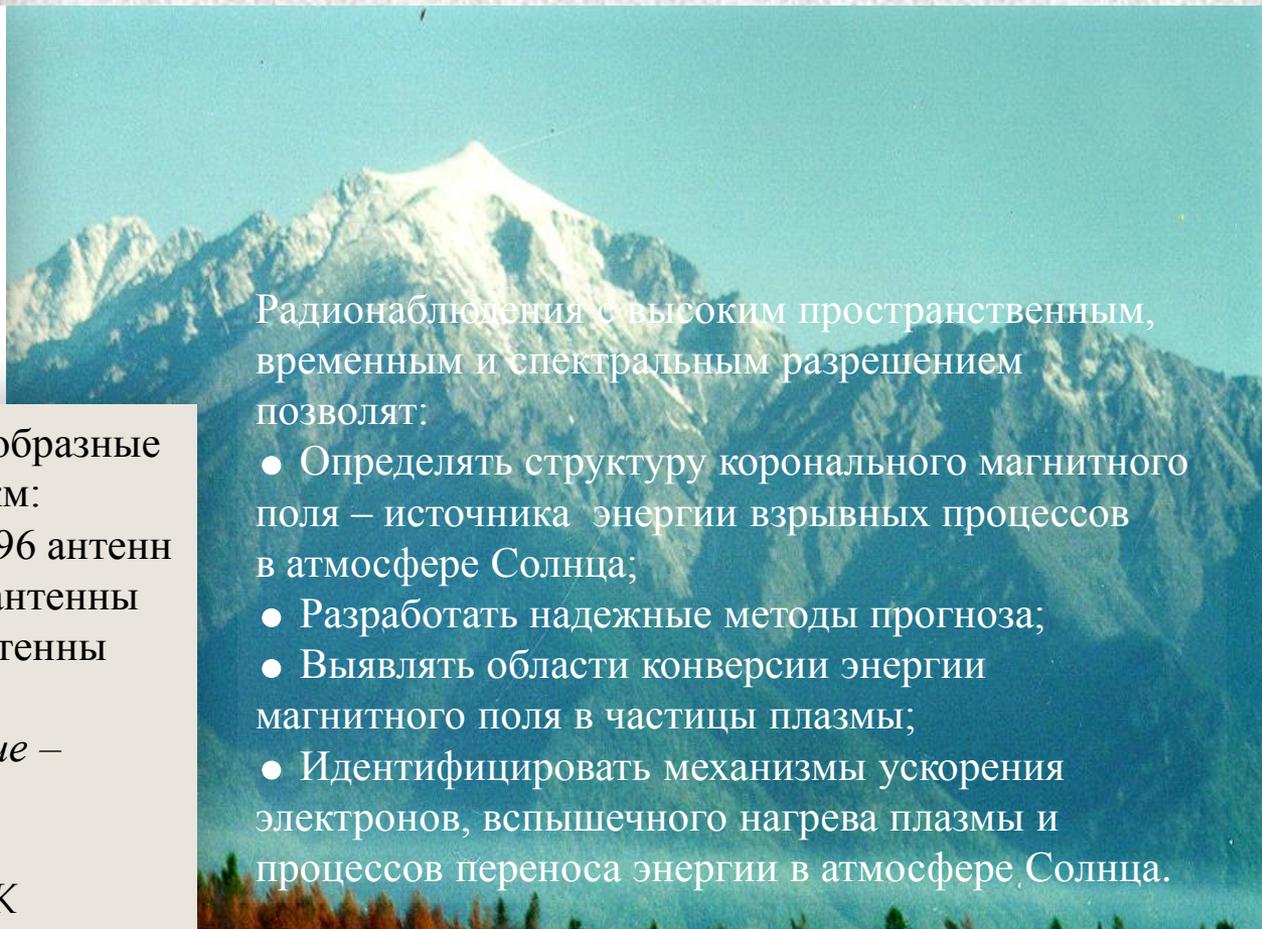
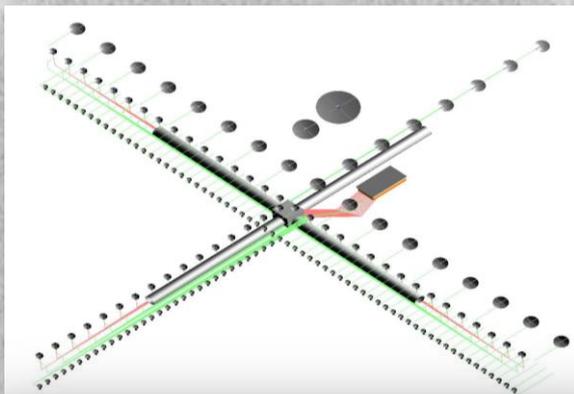


Схема антенного поля: три Т-образные
решетки с длиной луча до 1 км:
3–6 ГГц, диаметр антенн 3 м, 96 антенн
6–12 ГГц, диаметр 1.8 м, 192 антенны
8–24 ГГц, диаметр 1 м, 224 антенны

*Пространственное разрешение –
до 5 угл. сек на 6 ГГц,
временное – 0.01 сек,
шумовая температура < 100 К*

Радионаблюдения с высоким пространственным,
временным и спектральным разрешением
позволят:

- Определять структуру коронального магнитного поля – источника энергии взрывных процессов в атмосфере Солнца;
- Разработать надежные методы прогноза;
- Выявлять области конверсии энергии магнитного поля в частицы плазмы;
- Идентифицировать механизмы ускорения электронов, вспышечного нагрева плазмы и процессов переноса энергии в атмосфере Солнца.



Радиогелиограф (вид сверху)



Центральная часть радиогелиографа



Комплекс спектрополяриметров

- Мониторинг солнечной активности в уникально широком диапазоне 0.05–40 ГГц;
- Калибровка измерений интенсивности на радиогелиографе Бадары;
- Разработка систем и тестирование инструментов для глобальной российской сети.



Проект США
Frequency Agile
Solar Radiotelescope
0.05–21 ГГц



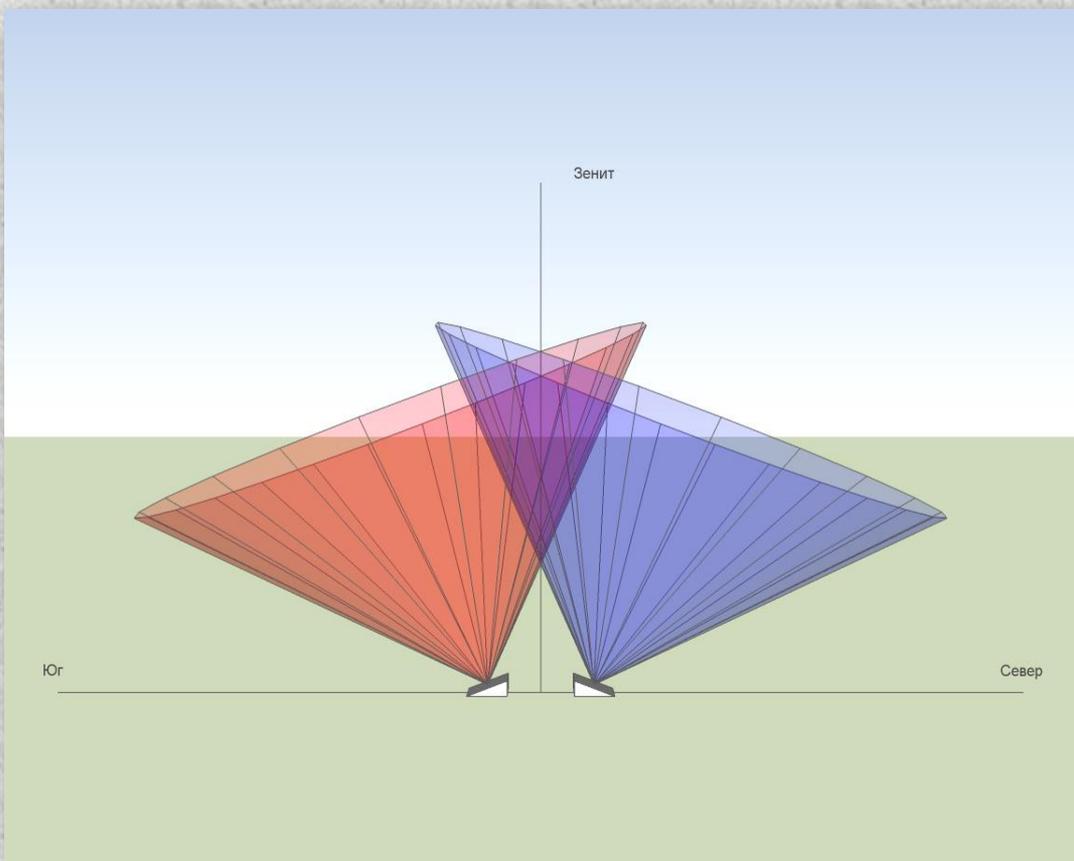
Chinese Spectral
Radio Heliograph
в стадии настройки
систем 0.4–15 ГГц 44

Многофункциональный мезосферно-стратосферно-тропосферный радар некогерентного рассеяния (НР-МСТ радар)

Основные задачи НР-МСТ радара:

- Измерение параметров нейтральной атмосферы в диапазоне высот 5–100 км. Контроль физических процессов и связей в системе литосфера–атмосфера.
- Наблюдения параметров плазмы на высотах 100–2000 км. Контроль физических процессов и связей в системе атмосфера–ионосфера–магнитосфера.
- Изучение процессов и геофизических последствий, возникающих в результате воздействия на ионосферную плазму мощным коротковолновым излучением. Разработка систем контроля событий искусственного воздействия на ионосферу.
- Контроль околоземного космического пространства. Наблюдения состояния и параметров движения космических аппаратов и исследование распределений космического мусора.
- Радиоастрономические наблюдения режиме излучения Солнца и космических радиоисточников.
- Экологический мониторинг атмосферы и циркуляционных процессов над поверхностью и вблизи озера Байкал.
- Разработка перспективных методов диагностики и прогноза состояния среды околоземного космического пространства.

Основные характеристики современного многофункционального НР-МСТ-радара



Конфигурация антенн НР-МСТ радара,
секторы сканирования

Основные технические характеристики:

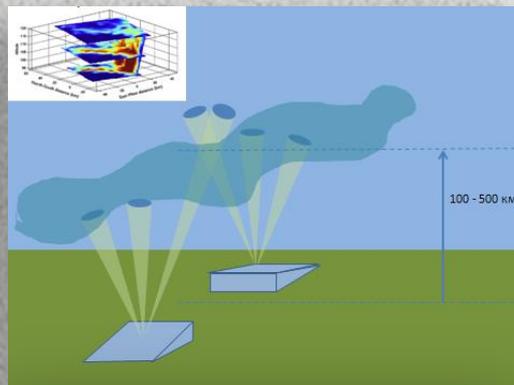
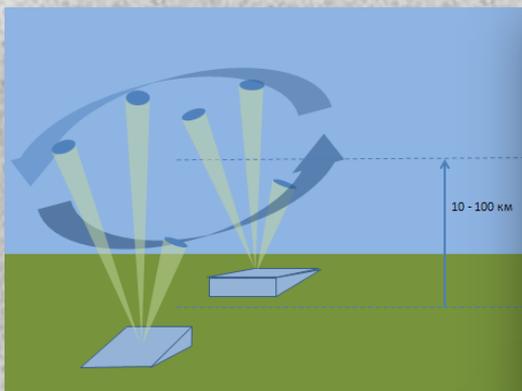
1. Рабочая частота ~ 160 МГц
2. Пиковая мощность излучения – 2 МВт
3. Заполненность цикла излучения – 33 %
4. Ширина полосы приема – до 5 МГц
5. Длительность импульса – 10–5000 мкс.
6. Частота повторения – 75–2000 Гц
7. Модуляция импульсов произвольная.
8. Поляризации – правая и левая круговые
9. Тип антенны – фазированная решетка

Конфигурация антенной системы

обеспечивает максимальный пространственный охват области зондирования и создает условия для проведения интерферометрических измерений. С этой целью антенная система НР-МСТ радара разбита на два поля размерами $\sim 40 \times 40$ м с расстоянием между ними 100 м в направлении магнитного меридиана.

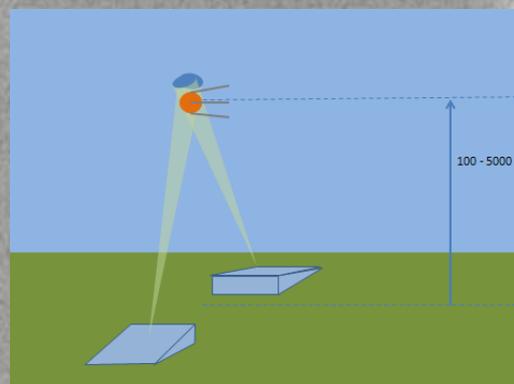
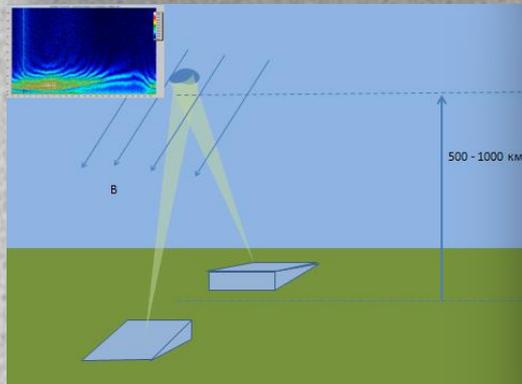
Основные режимы работы НР-МСТ радара

Диагностика динамики в нижней и средней атмосфере методом МСТ.
Экология оз. Байкал
Высоты 10–100 км.



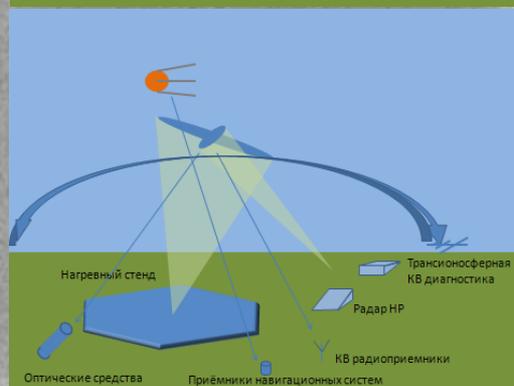
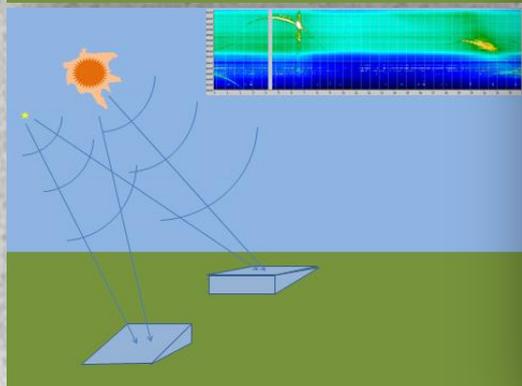
Изучение взаимодействий в системе атмосфера–ионосфера методом НР.
Многopараметрическая диагностика ионосферной плазмы.
Интерферометрия и радиоголография
Высоты 100–500 км.

Изучение взаимодействий в системе ионосфера–плазмосфера.
Определение вариаций ионного состава и направлений потоков плазмы.
Высоты 500–2000 км.

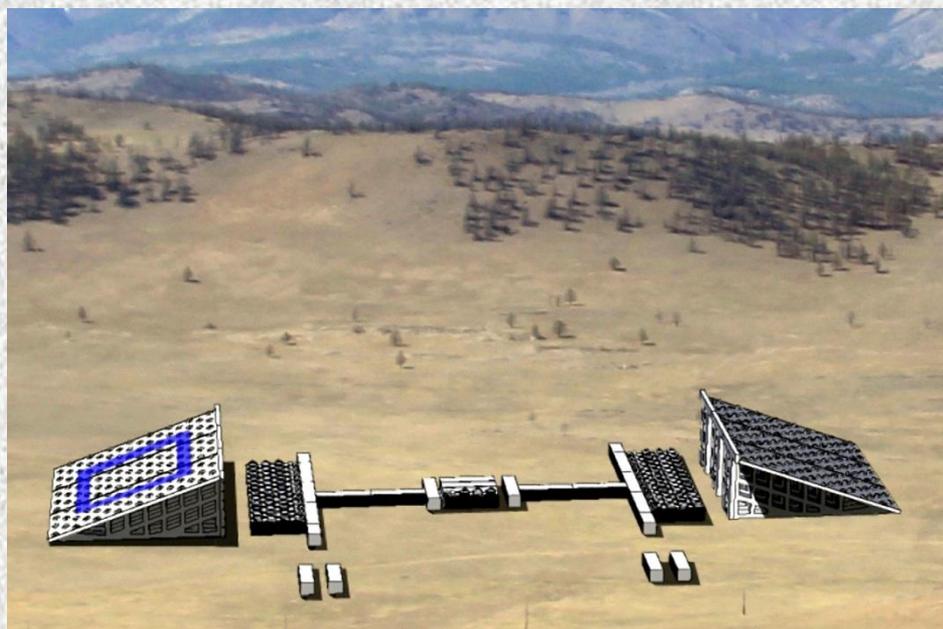


Наблюдение космических аппаратов и «космического мусора».
Разработка методов повышения точности и информативности контроля космического пространства
Высоты 100–5000 км.

Радиоастрономические наблюдения излучения Солнца и космических радиисточников.
Изучение радиобурь и мерцаний радиосигналов.



Комплексная диагностика явлений, возникающих при мощном высокочастотном воздействии на ионосферу



Радар НР-МСТ в районе озера Байкал

Современные зарубежные аналоги радара НР-МСТ

Радар НР Покер-Флэт (Аляска)



Радар НР Резолют Бэй (Канада)



Современные радары НР являются основным средством диагностики многообразных эффектов и явлений, возникающих при воздействии на ионосферу мощным коротковолновым излучением.

Нагревный стенд HAARP (Аляска)

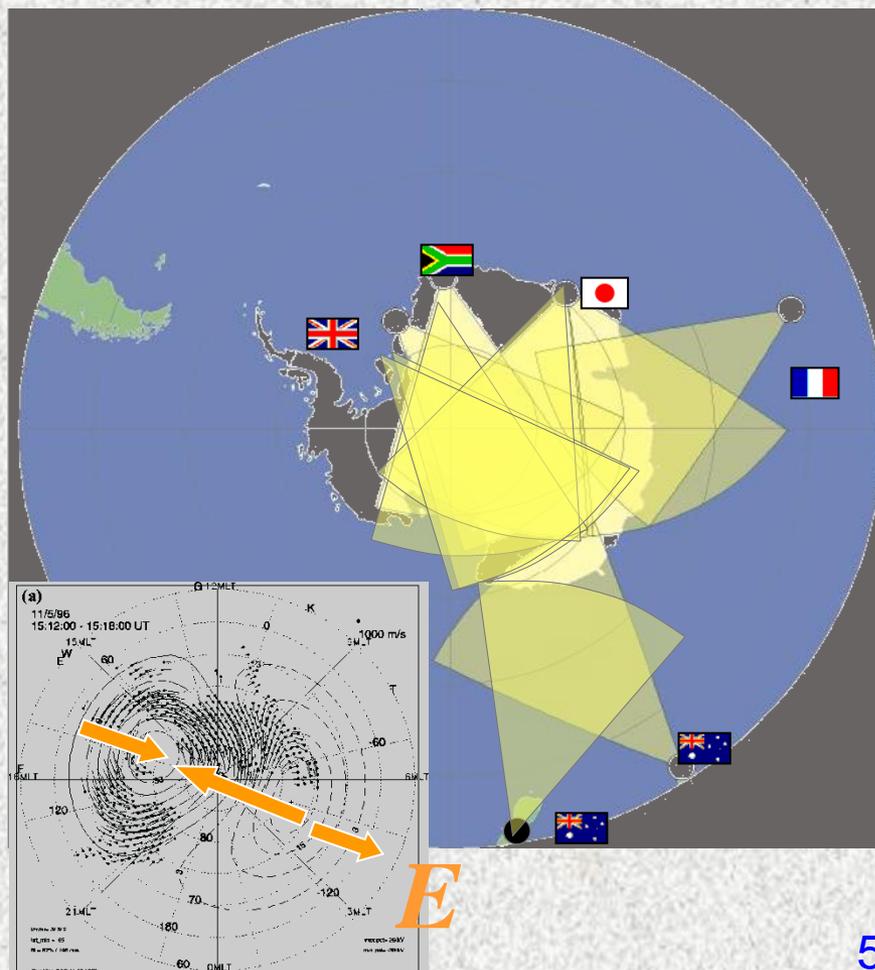
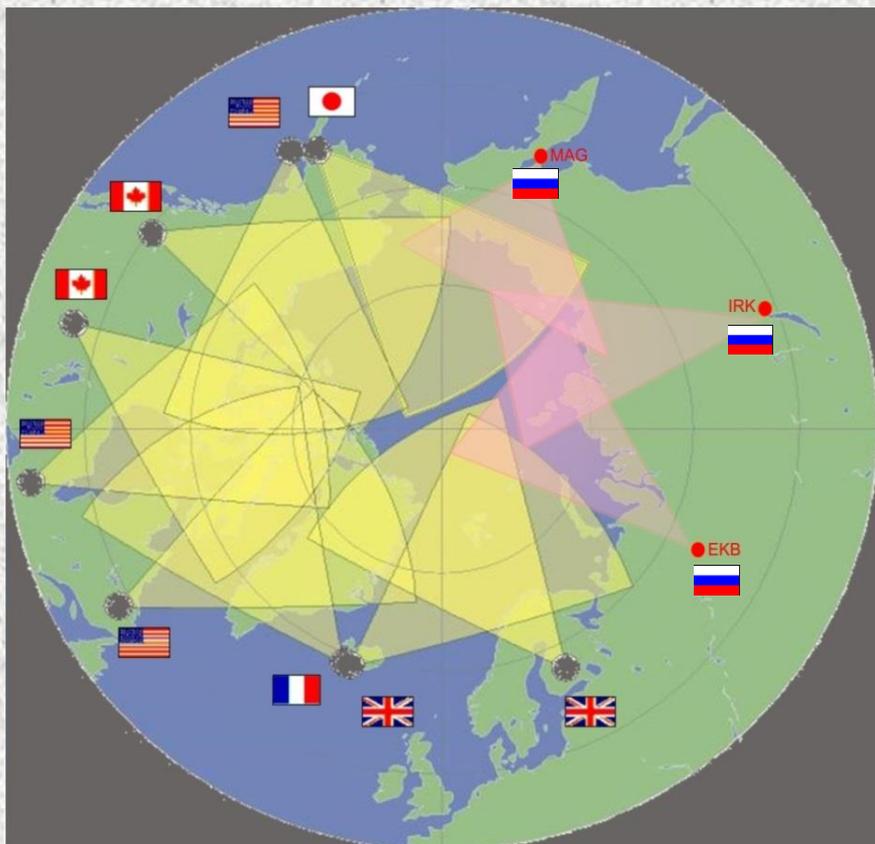


Нагревный стенд SPEAR (Шпицберген)



Российский сегмент когерентных ВЧ-радаров международной сети SuperDARN

- Взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой и ионосферой;
- Атмосферные гравитационные волны;
- Естественные и искусственные плазменные неоднородности.

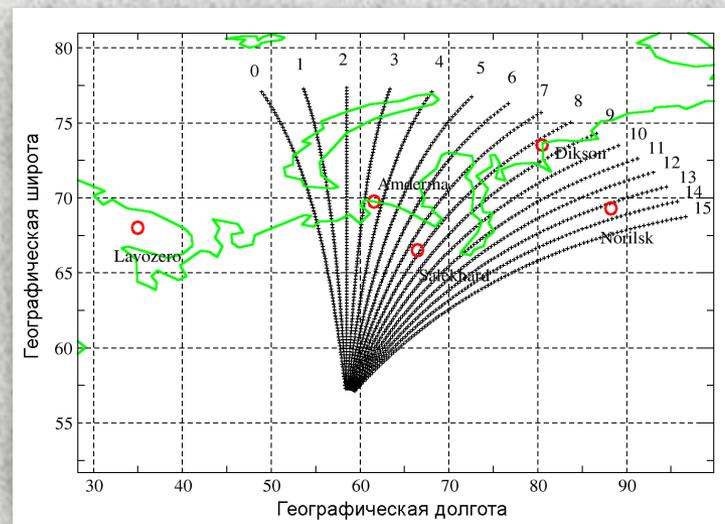


Радар ЕКВ (Екатеринбург)

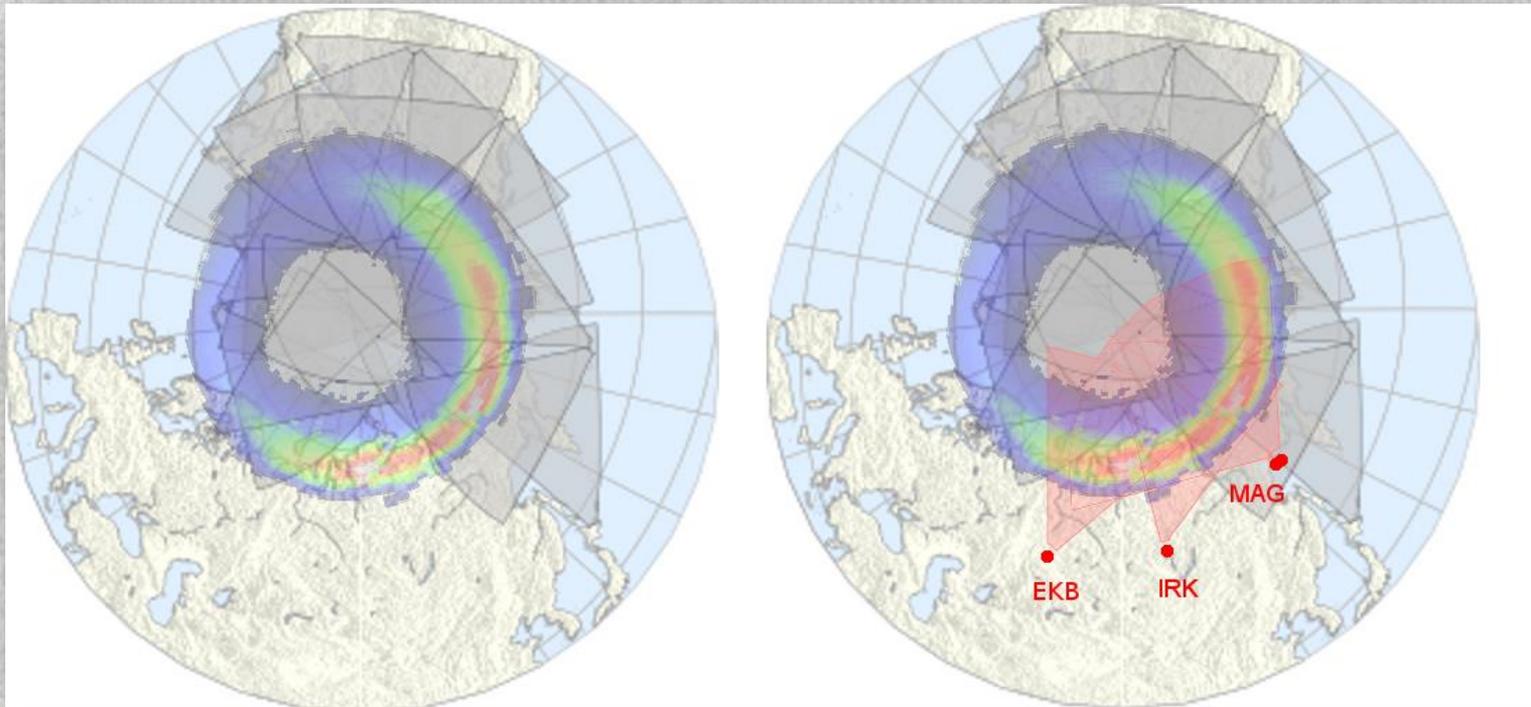


Технические параметры ВЧ-радар

Тип антенн	ФАР (16 элементов)
Пиковая мощность	16.6 КВт
Частотный диапазон	8–20 МГц
Ширина луча диаграммы	3.6°
Сектор обзора по азимуту	52°
Длительность импульса	100–300 мкс



Контроль ионосферы в Арктическом регионе

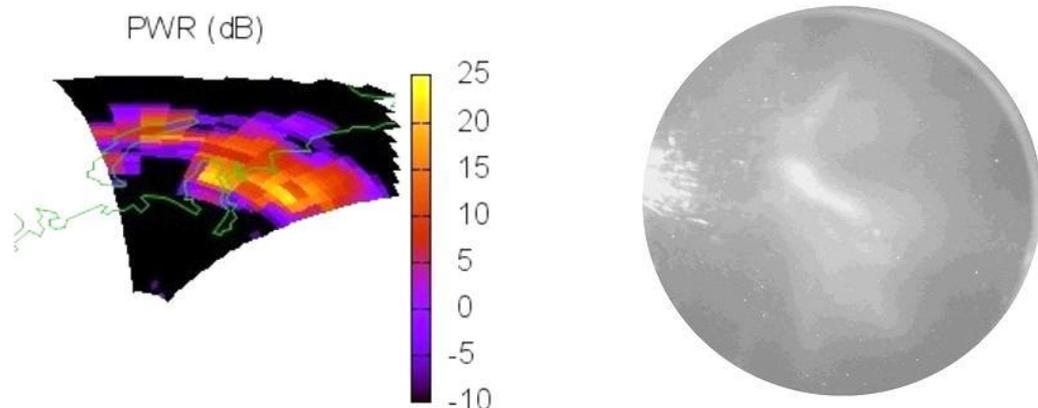


Мировая сеть радаров SuperDARN предназначена для мониторинга процессов в высокоширотной ионосфере, особенно в зоне полярного овала, наиболее чувствительного к процессам солнечно-земного взаимодействия. Примерное положение полярного овала (цветная область) и сектора обзора радаров существующей международной сети (серые сектора) приведены на рисунке слева.

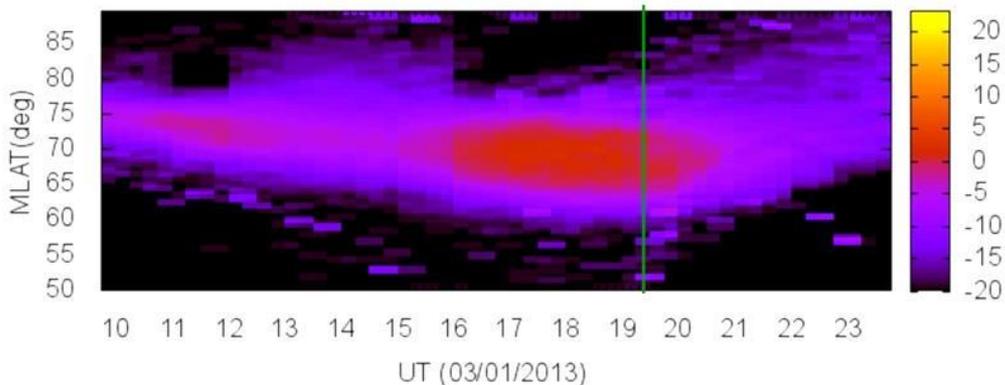
Виден большой долготный пробел в секторах покрытия, связанный с отсутствием подобных радаров на территории России.

Задачей проекта является создание и развертывание 4-мобильных когерентных радаров на территории России, позволяющих замкнуть мировую цепочку станций вокруг арктического региона и проводить круглосуточный мониторинг процессов в высокоширотной ионосфере. Возможные сектора контроля российских радаров обозначены красным цветом.

Комплексный радиофизический, оптический и спутниковый мониторинг возмущений в ионосфере арктического региона



OVATION prime+ACE, Eflux(dB) at 60E



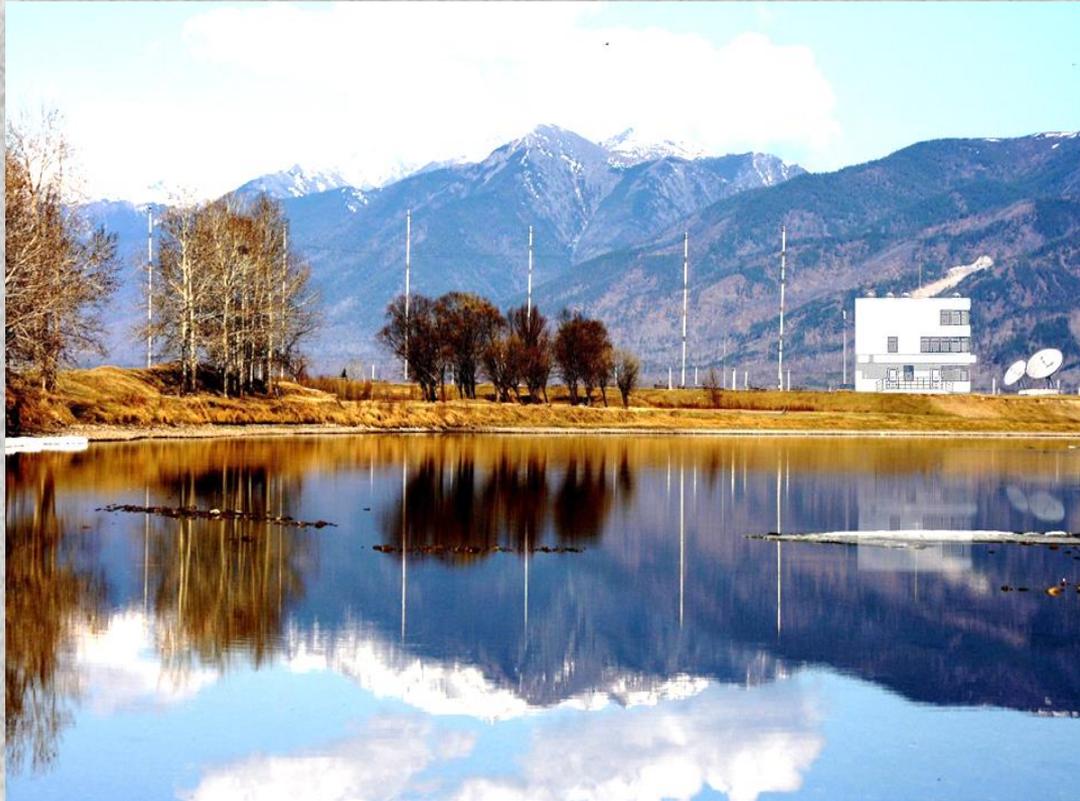
Одной из главных задач когерентных радаров является мониторинг интенсивности мелкомасштабных ионосферных неоднородностей, влияющих на радиолокационные системы и устройства радиосвязи КВ-УКВ средства России в арктическом регионе.

Интенсивность радиолокационных помех, по данным когерентного радара ЕКВ ИСЗФ СО РАН, Свердловская обл. (рисунок слева вверху).

Интенсивность полярного сияния по данным Норильской КМИС ИСЗФ СО РАН (рисунок справа вверху).

Интенсивности полярных высыпаний как функции геомагнитной широты и времени По данным спутника ACE.

Комплекс оптических инструментов



Используемые эффекты (явления):

собственное излучение, рассеянное излучение.

Измерительные технологии:

фотометрия, лазерное зондирование.

*Оптические исследования
средней и верхней
атмосферы Земли
и ближнего космоса*

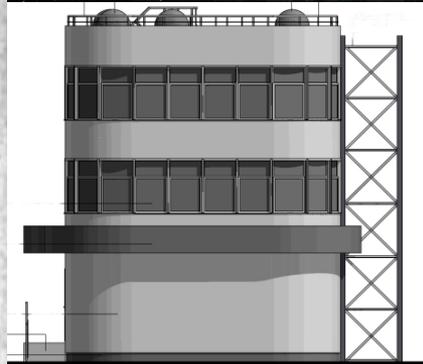
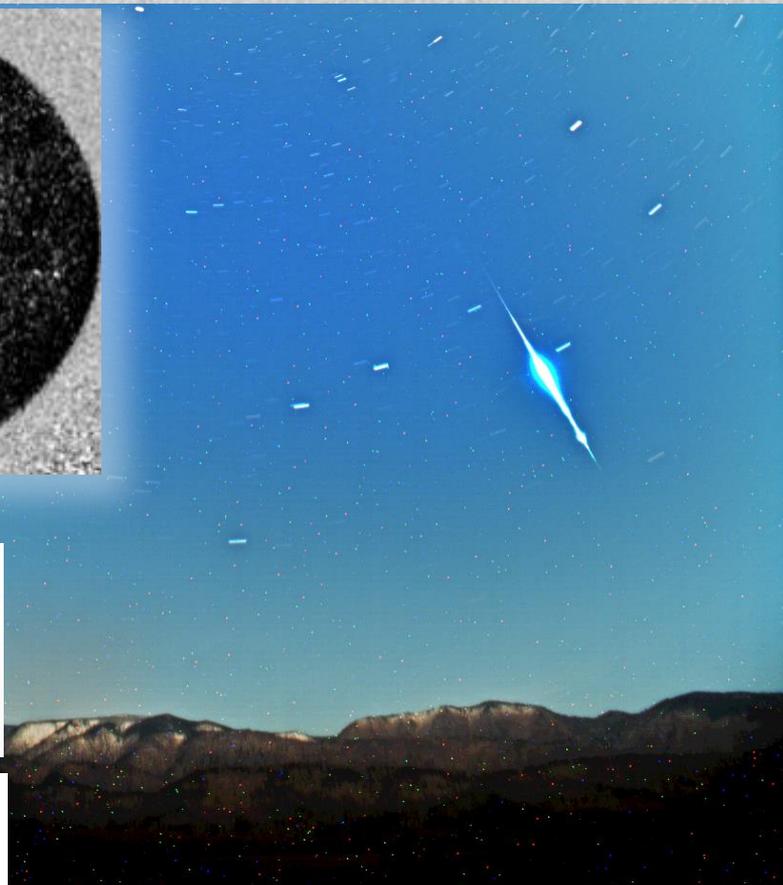
Задачи:

- исследование атмосферных и ионосферных процессов и явлений;
- измерение профильных характеристик температуры, ветра, потоков энергии, аэрозолей, содержания атомов, молекул, ионов, электронов в естественных условиях и при гелиогеофизических возмущениях различной природы.



Проект технологического здания для размещения оптических инструментов

Мониторинг атмосферных процессов и явлений



Пассивные оптические инструменты:
интерферометры, спектрографы,
Спектрометры, фотометры,
камеры всего неба.



Мезосферно-стратосферный лидар

Площадь приемной антенны – 4.7 м^2 ,
энергия лазерного импульса – 1.6 Дж .

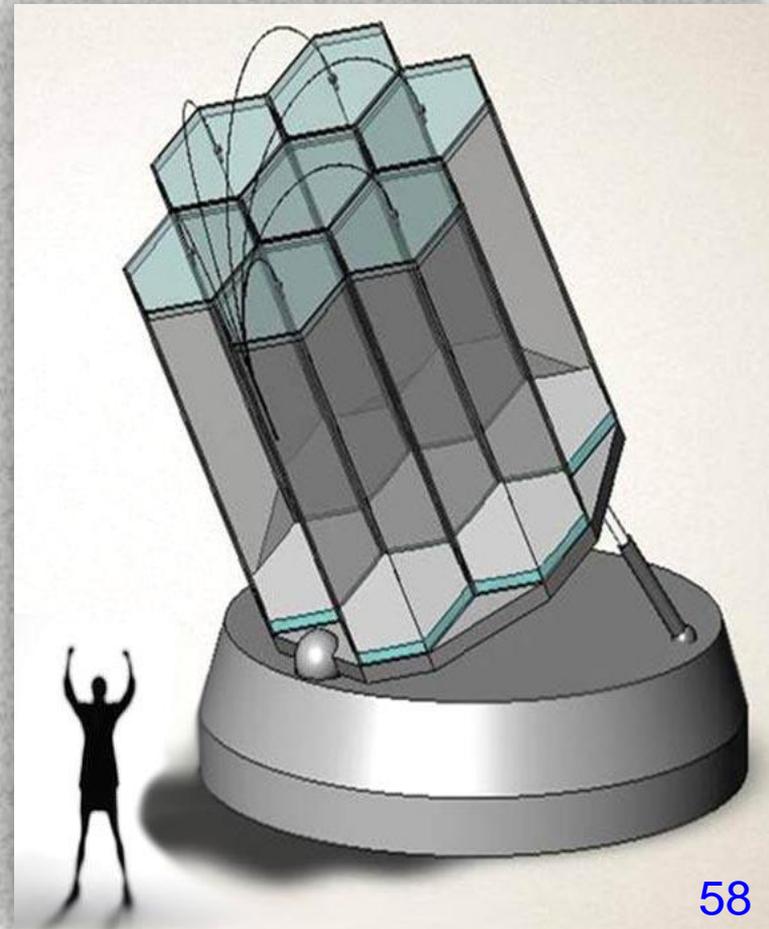
Измеряемые параметры:

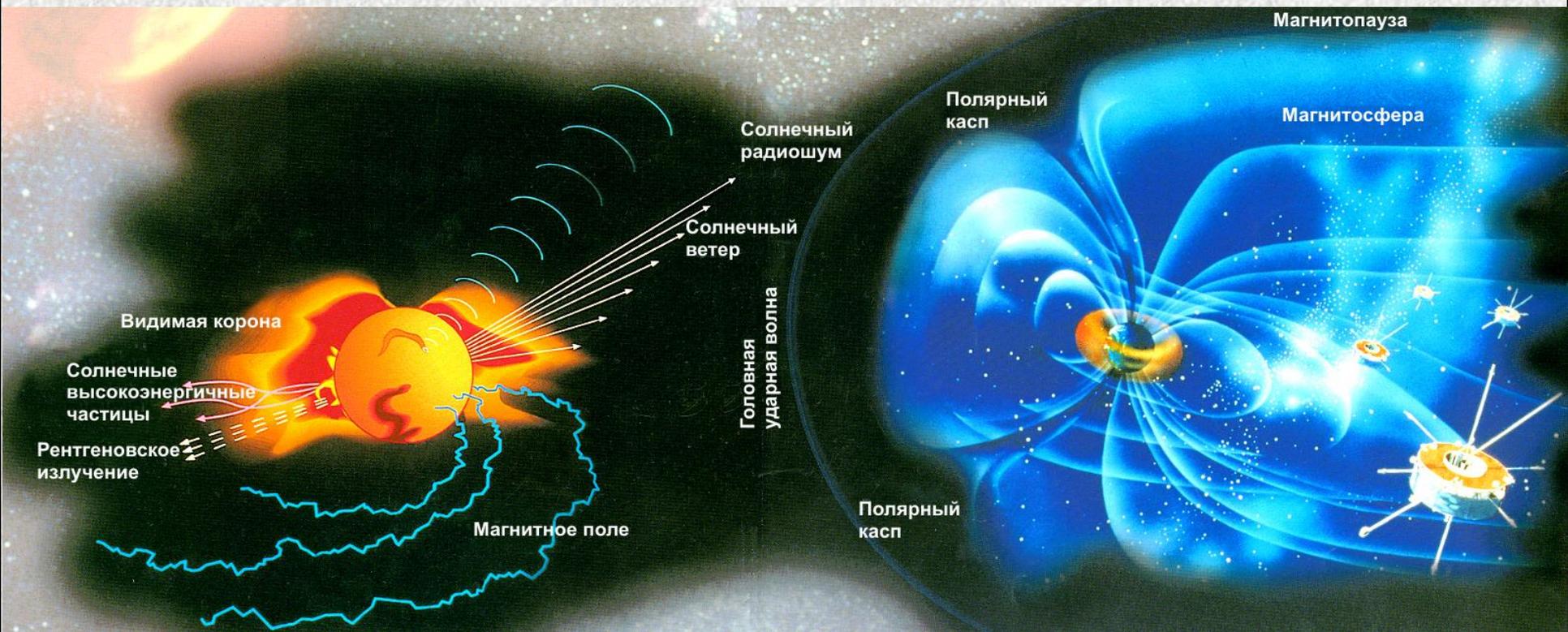
- температура, скорость и направление ветра;
- плотность, аэрозоли в страто- и мезосфере;
- оптические свойства слоя Na в мезосфере;
- озон в стратосфере.

Исследуемые высоты: до 100–120 км.

Используемые эффекты взаимодействия лазерного излучения с атмосферной средой:

- упругое (Ми), молекулярное (рэлеевское) рассеяние;
- комбинационное (рамановское) рассеяние;
- дифференциальное поглощение;
- резонансное рассеяние (флуоресценция).





СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !