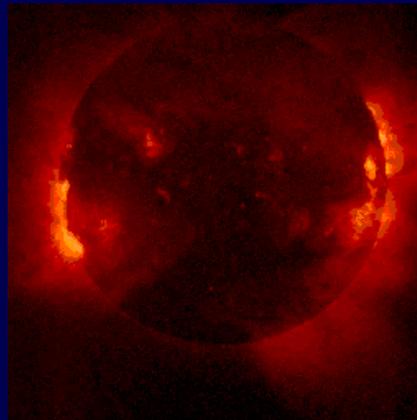
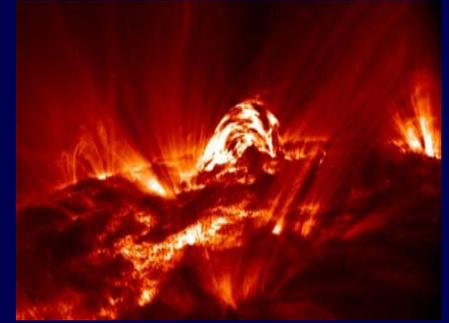


Что мы знаем и чего не знаем о Солнце и солнечно-земных связях?

Ю.А. Наговицын

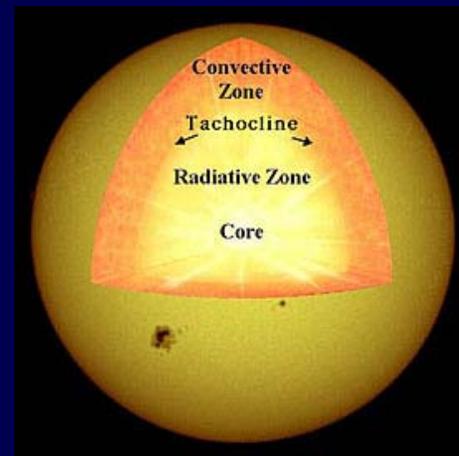


План:



- 1. Солнце: общие сведения.
- 2. Магнитное поле Солнца и солнечная активность
- 3. Солнечная активность и космическая погода
- 4. От космической погоды к космическому климату
- 5. Солнечная активность и климат Земли
- 6. Дополнение: Горная станция – основная наблюдательная база ГАО РАН
- 7. Вопросы.

1. Солнце: общие сведения.



«Досье» СОЛНЦА

Радиус Солнца = 695,990 км = 109
радиусов Земли

Масса Солнца = $1.989 \cdot 10^{30}$ кг =
333,000 масс Земли

Светимость Солнца (энергия, выходя-
щая от Солнца) = $3.846 \cdot 10^{33}$ эрг/с
= $3.846 \cdot 10^{26}$ Вт/с

Температура видимой поверхности
(фотосферы) = 5770° К

Плотность фотосферы = $2.07 \cdot 10^{-7}$ г/см³
= $1.6 \cdot 10^{-4}$ плотности воздуха

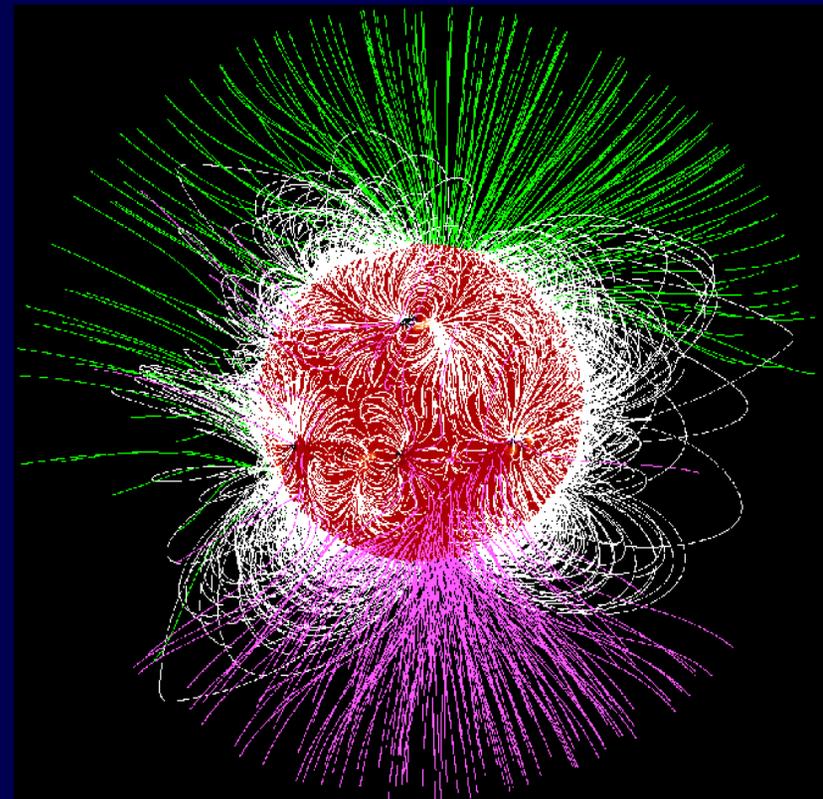
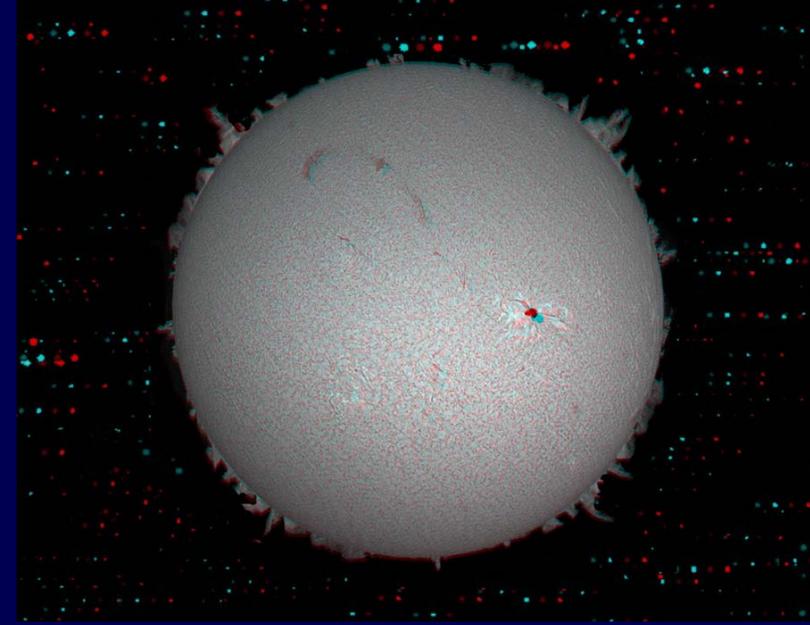
Химический состав = 70% H, 28% He,
2% (C, N, O, ...) на ед. массу

Температура ядра = $15,600,000^\circ$

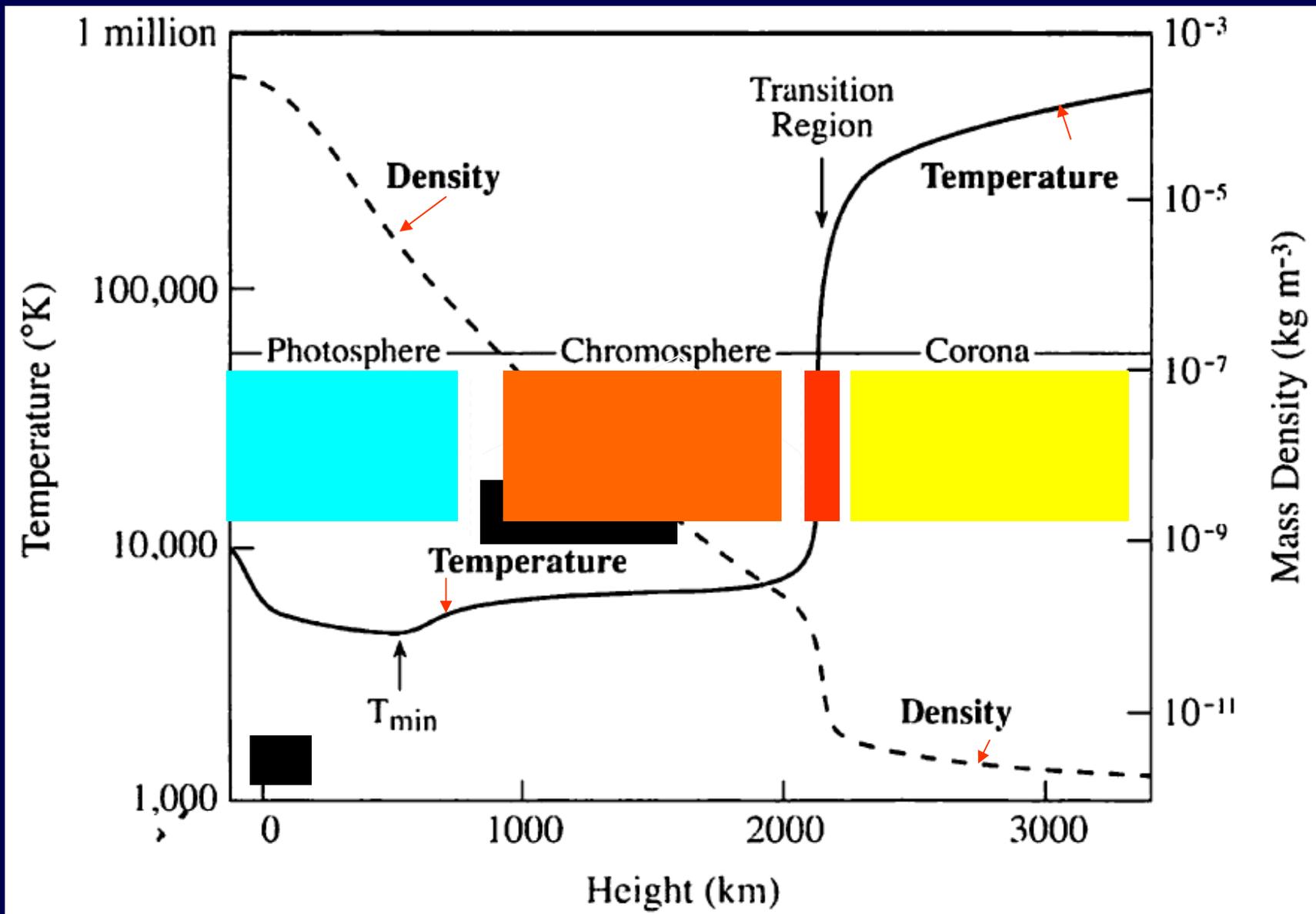
Плотность ядра = 150 г/см³ = $8 \times$
плотности золота

Химический состав ядра = 35% H, 63%
He, 2% (C, N, O, ...) на ед. массу

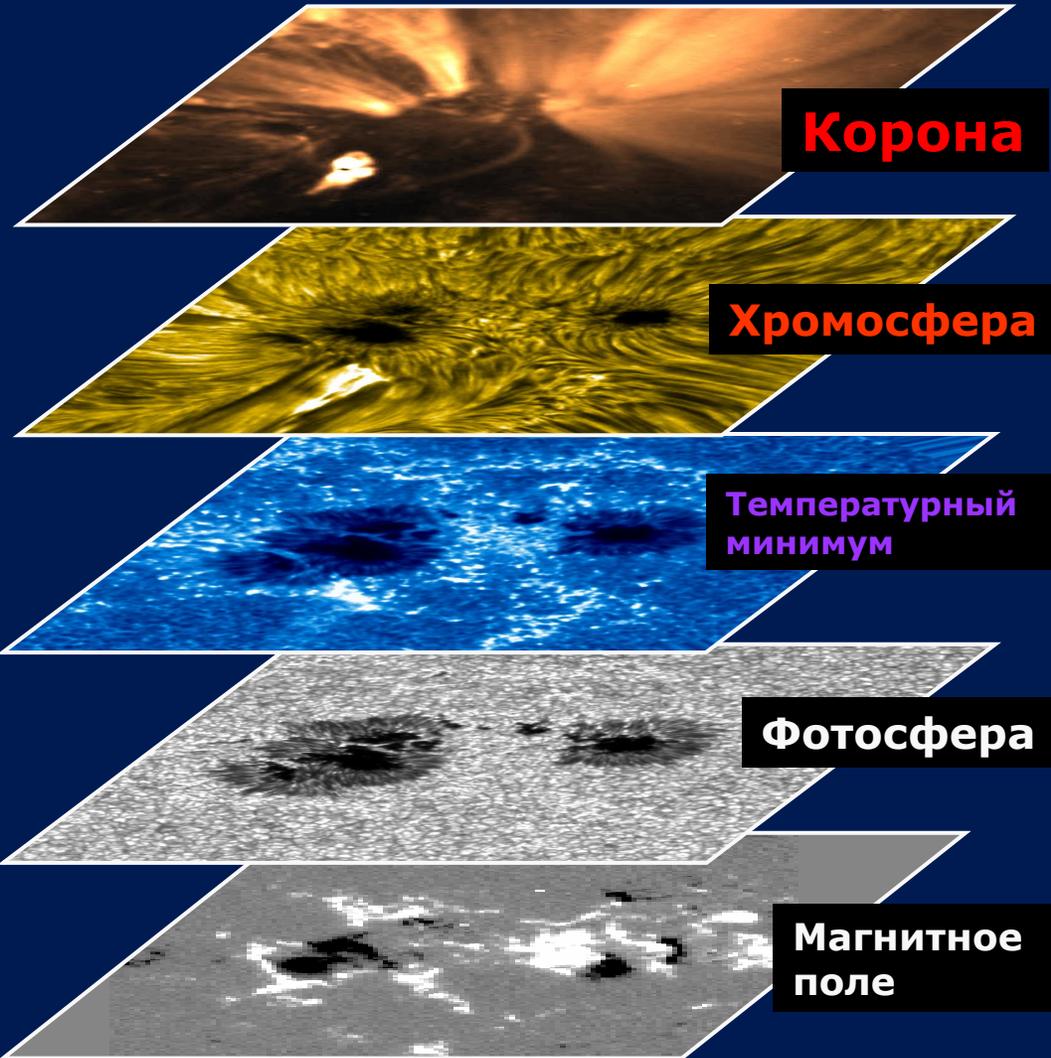
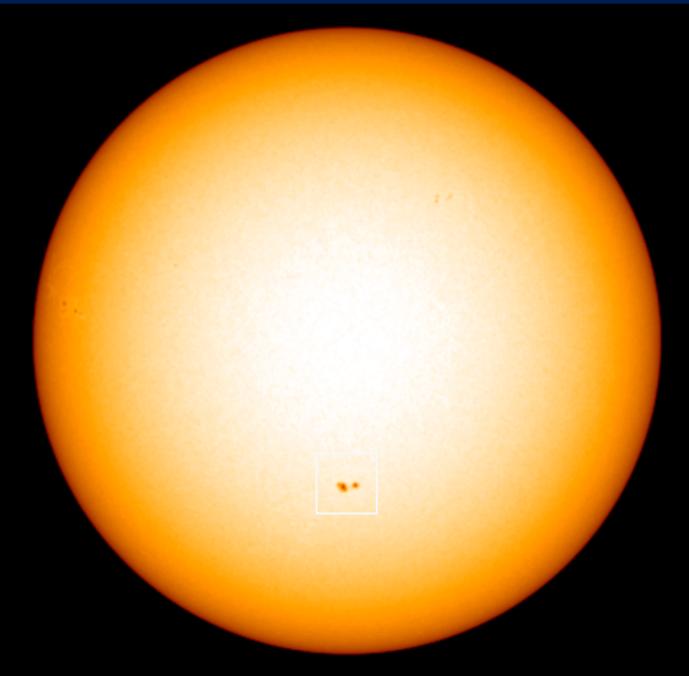
Возраст Солнца = $4.57 \cdot 10^9$ лет

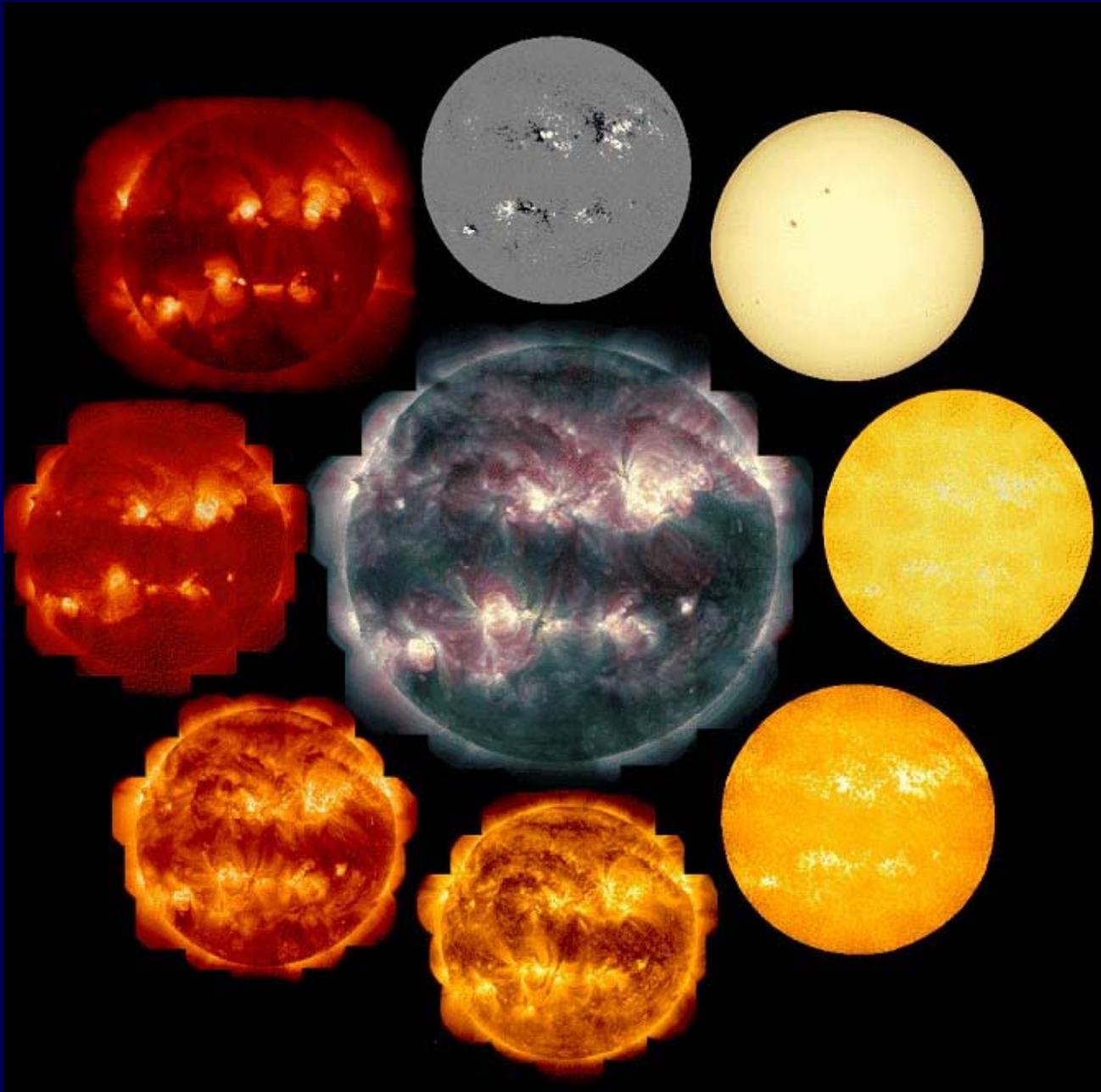


Распределение температуры и плотности в спокойной солнечной атмосфере



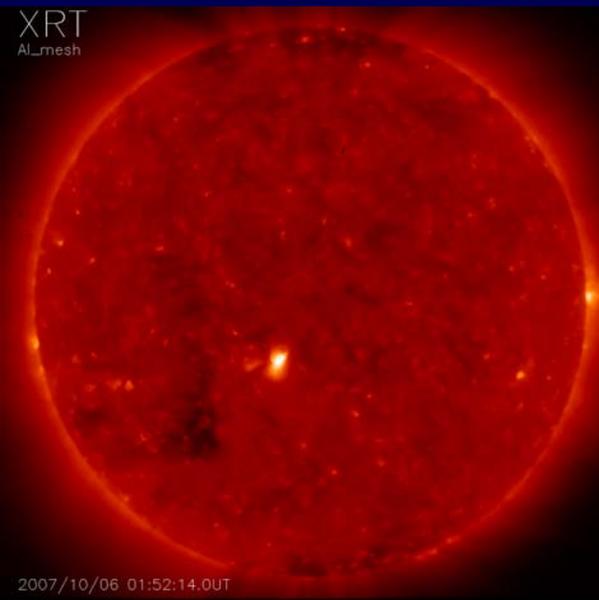
Каждому спектральному изображению соответствует определенный температурный слой в солнечной атмосфере



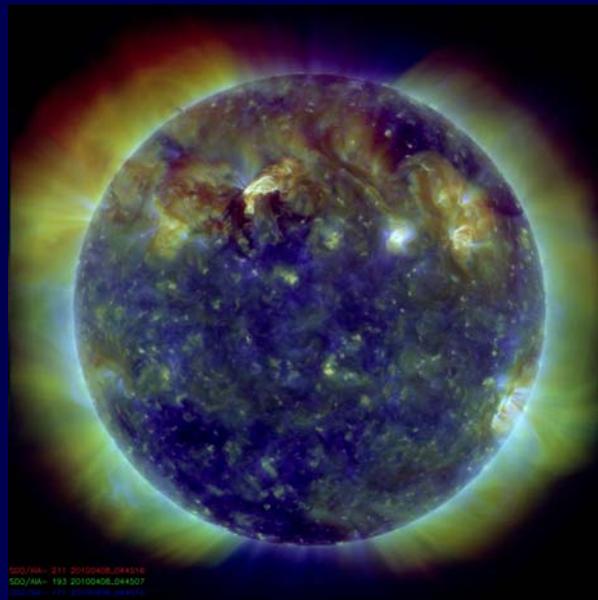


«Томография
Солнца»:
Просматриваем
3D-атмосферу

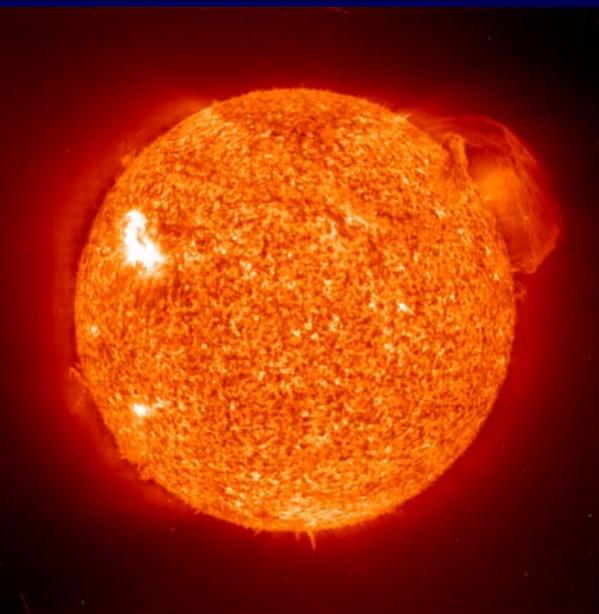
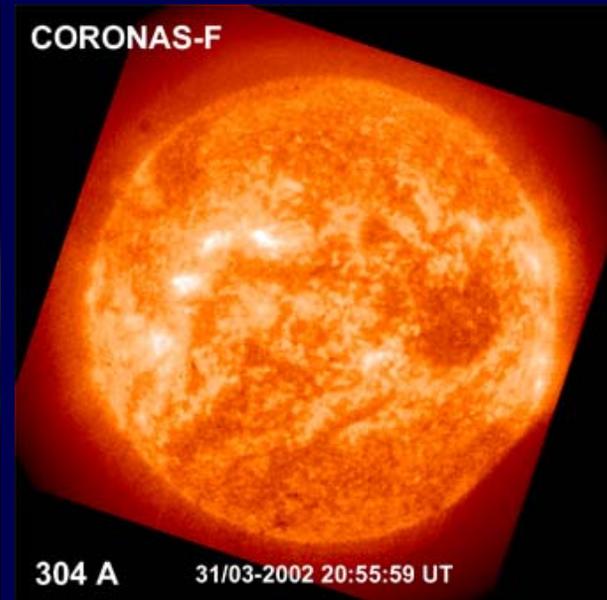
Hinode



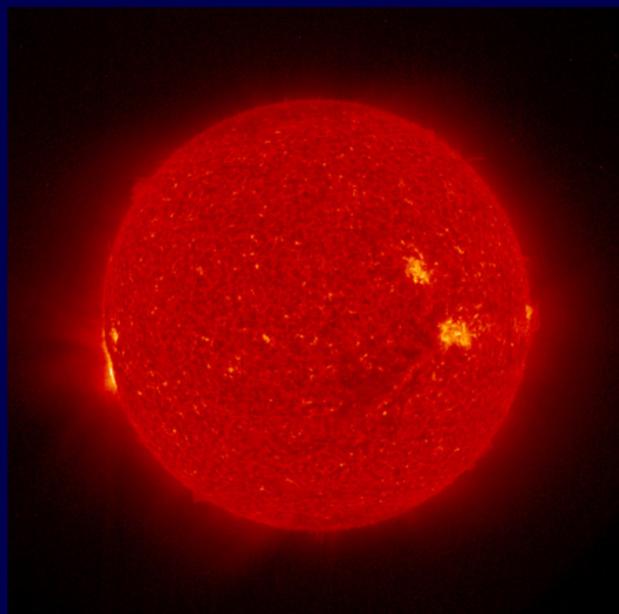
SDO



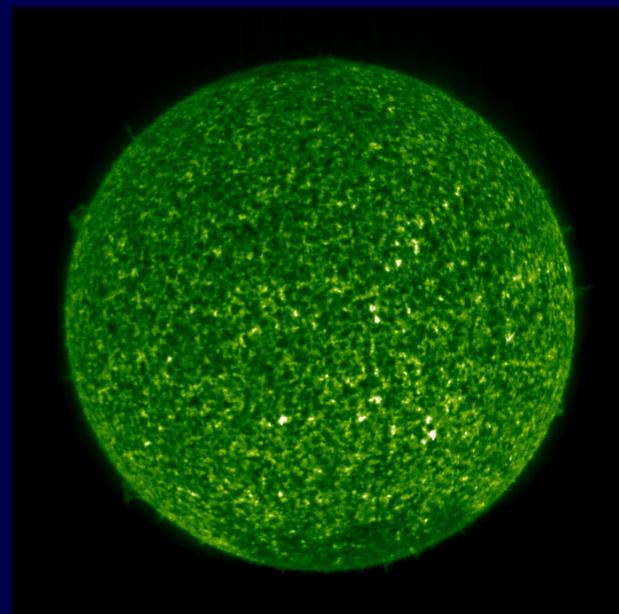
ΚΟΡΟΗΑΣ-Φ



SOHO

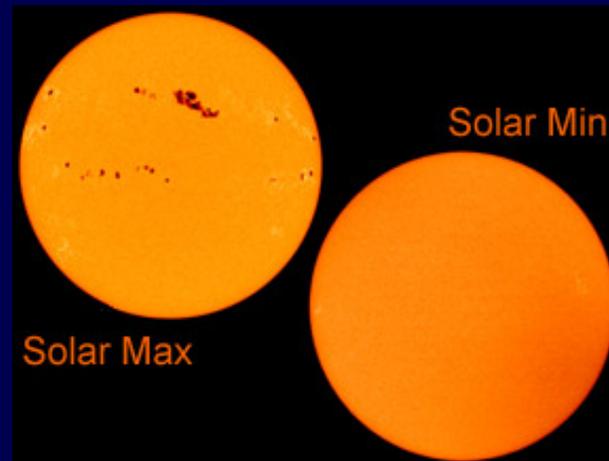


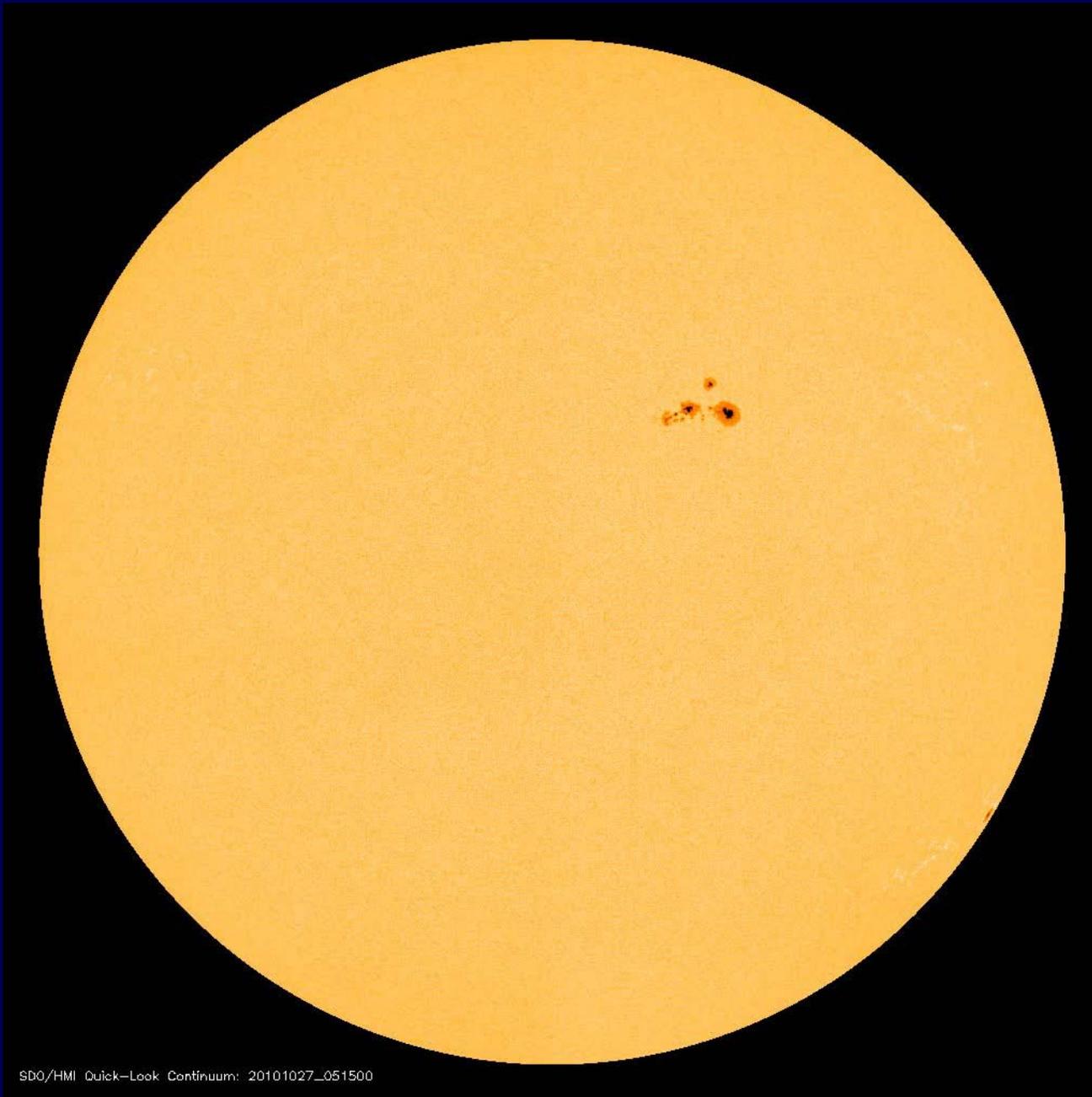
STEREO



ΚΟΡΟΗΑΣ-ΦΟΤΟΗ

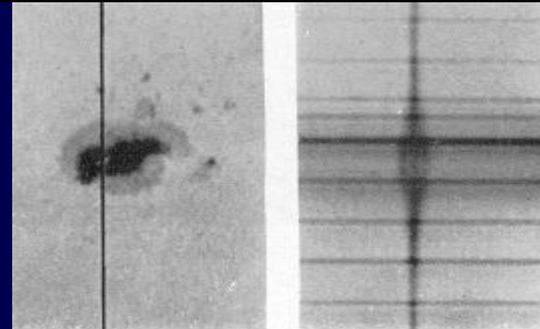
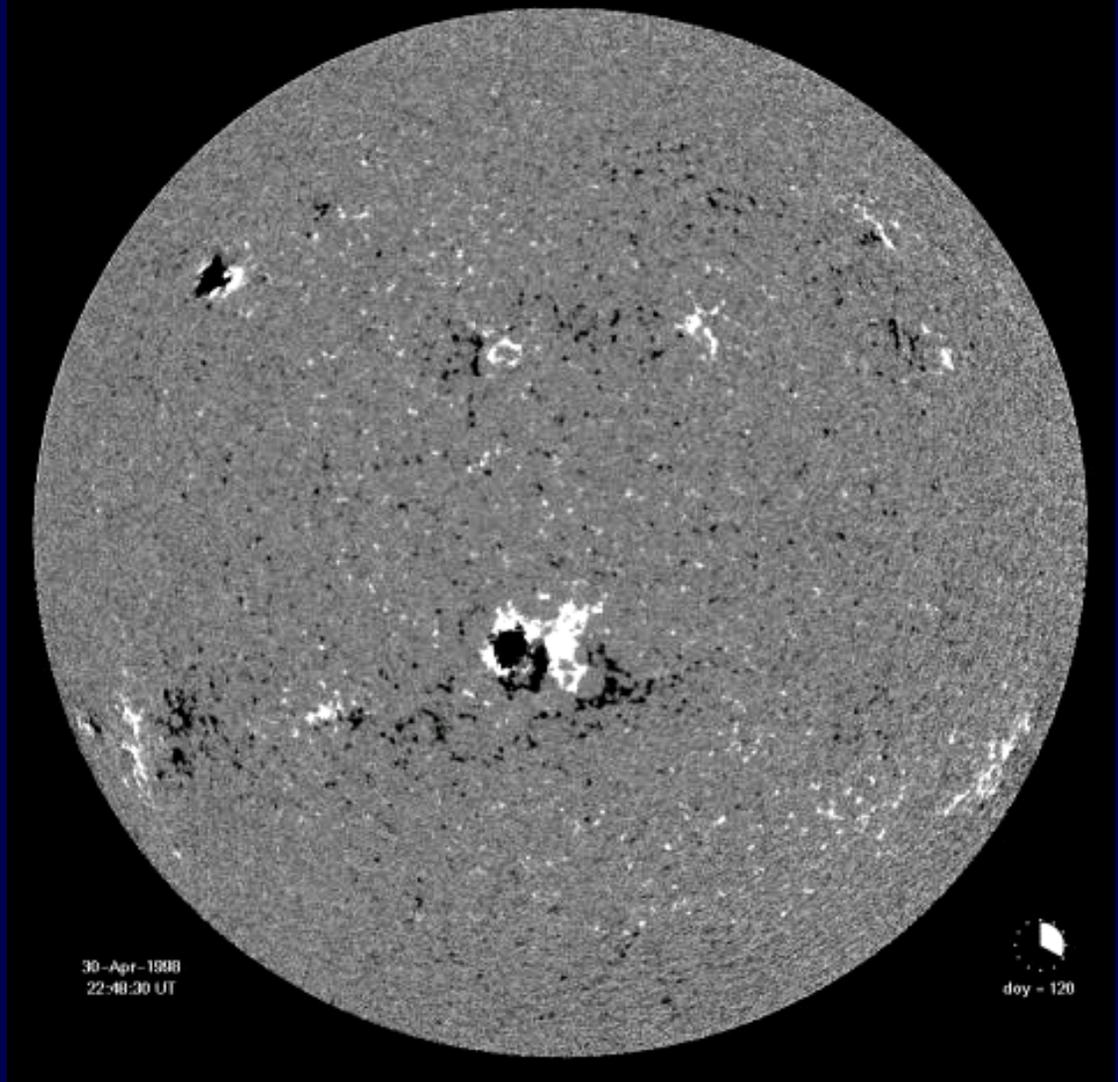
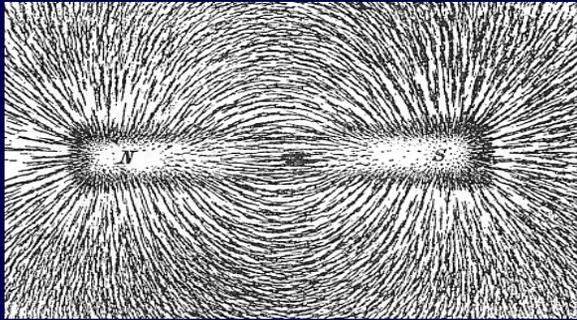
2. Магнитное поле Солнца и солнечная активность





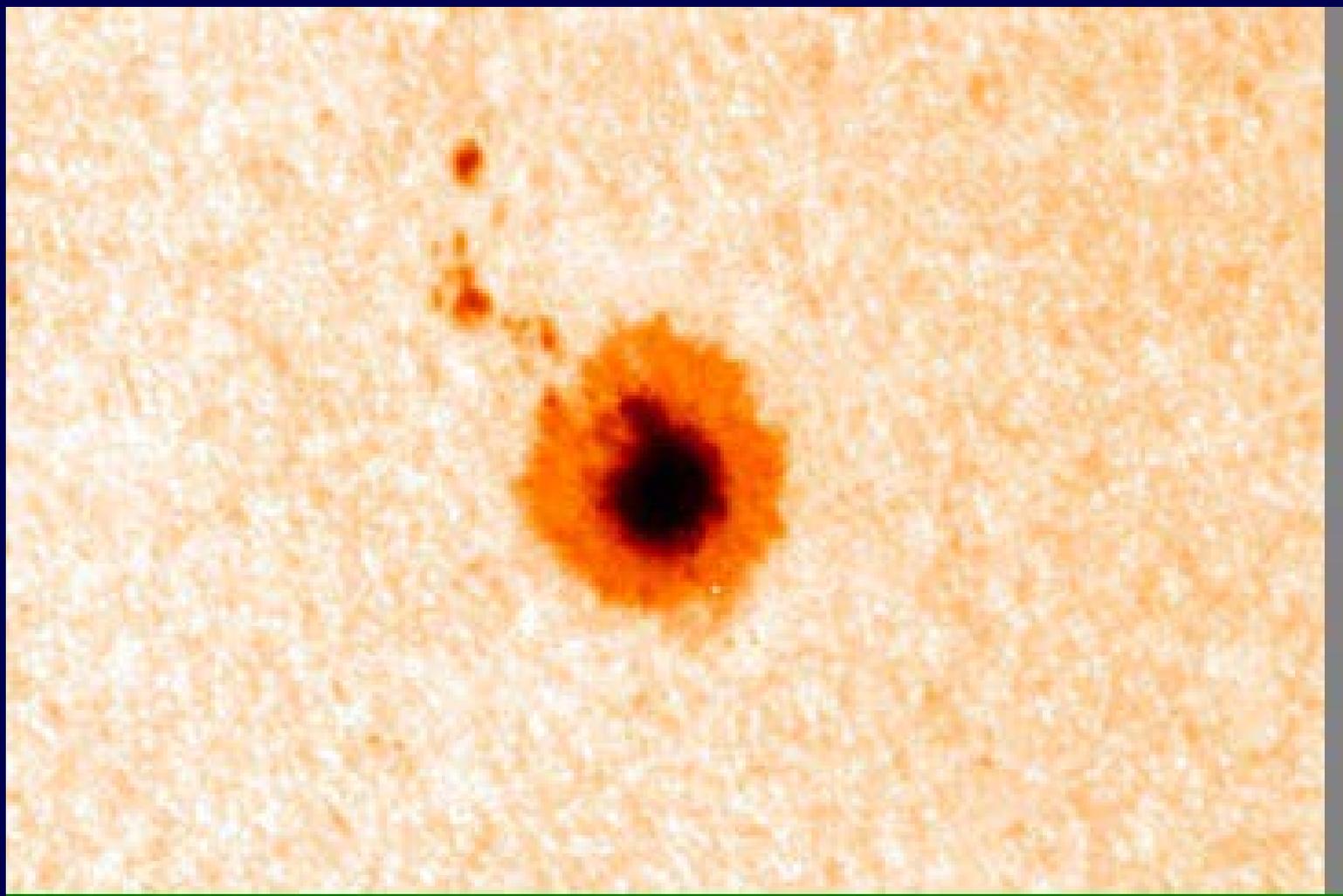
Октябрь
2010

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ НА СОЛНЦЕ



1908: магнитная природа солнечных пятен, Д. Э. Хэйл: расщепление спектральных линий в магнитном поле солнечного пятна (эффект Зеемана).

Солнечное пятно в 3D

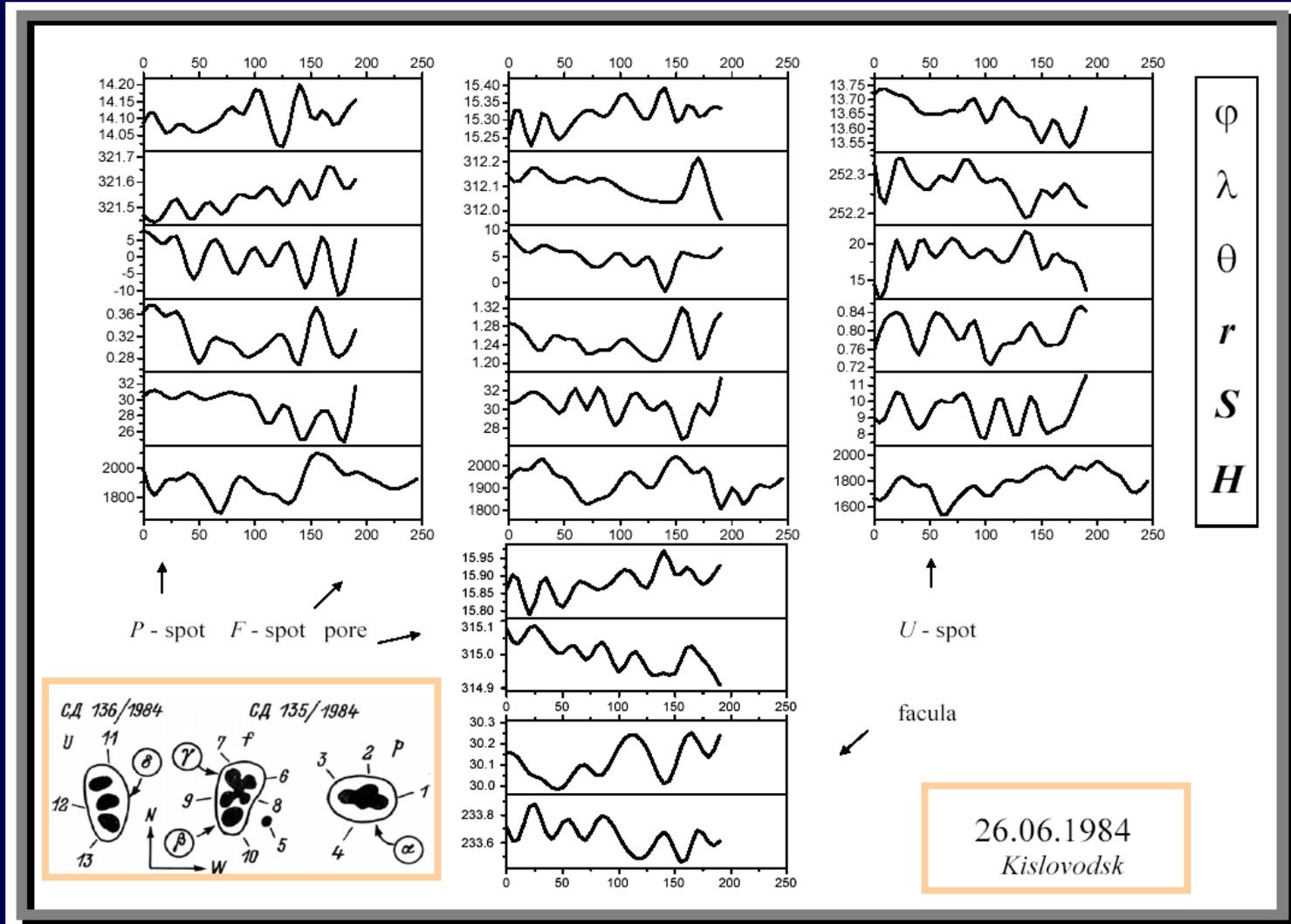


Долгопериодические колебания солнечных пятен

Наблюдательные данные :

- наблюдения временных изменений горизонтального поля скорости (ГАС ГАО, ГАО);
- наблюдения зеемановского расщепления магниточувствительных спектральных линий пятен на трех обсерваториях (ГАС ГАО, ГАО РАН, ИГА Кубы);
- наблюдения доплеровских смещений спектральных линий в спектре пятен (ГАО РАН);
- отслеживание рекуррентности вспышечных событий в АО по данным Мировой службы Солнца (ГАО РАН);
- наблюдения интенсивности циклотронного радиоизлучения надпятенных источников по данным радиогелиографов Нобеяма и ССРТ (ГАО, ИСЗФ, НИРФИ).
- **Эти данные, полученные ранее с помощью наземных наблюдений в разных обсерваториях и согласующиеся между собой, подтверждены наблюдениями на КА SOHO (MDI).**

Первые наблюдения различных конфигураций долгопериодических КПК

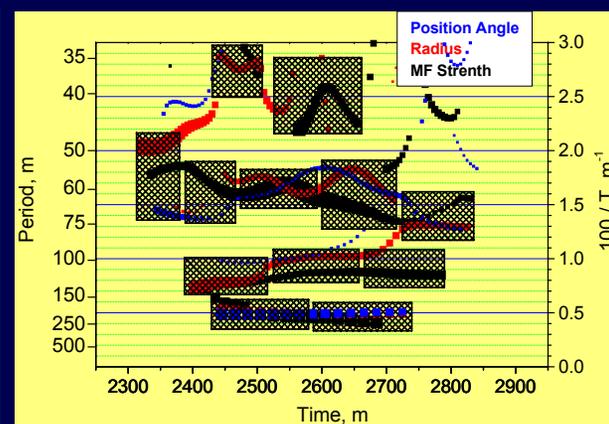
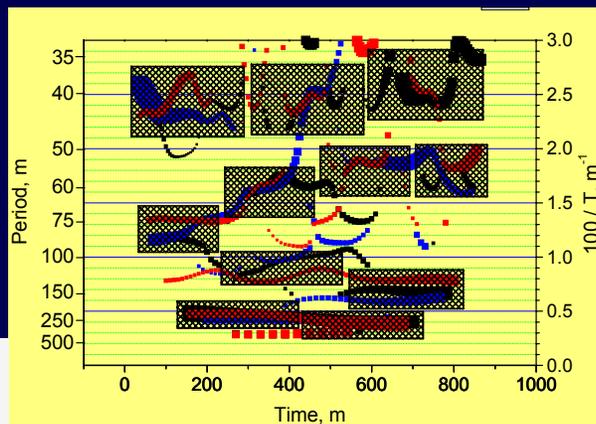
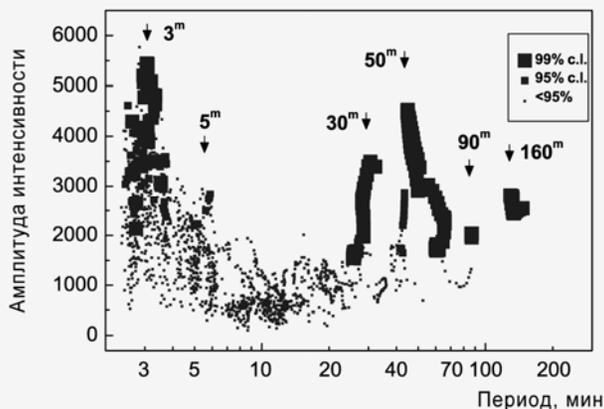


Долгопериодические колебания солнечных пятен

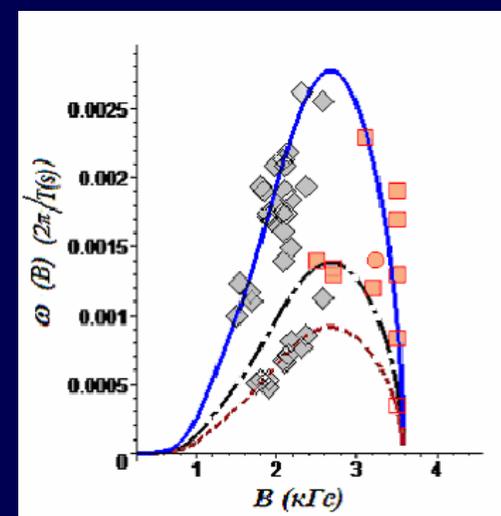
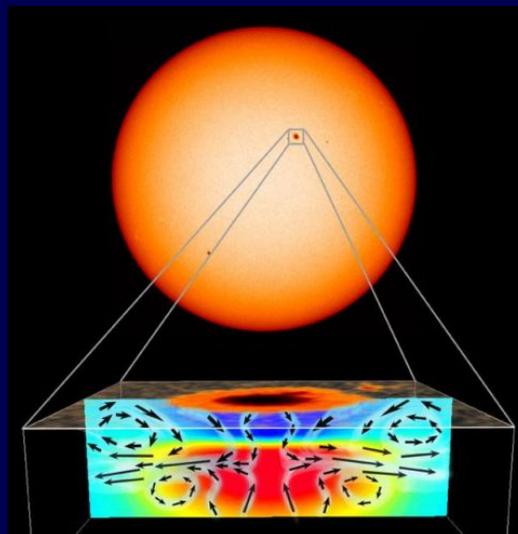
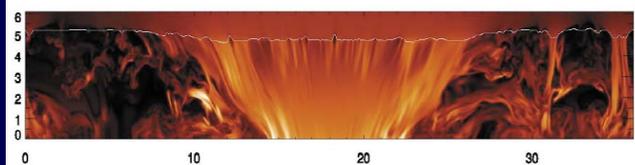
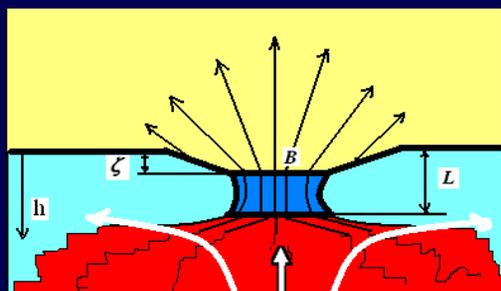


На основе анализа наблюдений КА SOHO (MDI) по вариациям напряженности магнитного поля пятен подтвержден ранний вывод из наземных наблюдений о том, что в активных областях Солнца существует особый класс колебательных движений: долгопериодические колебания солнечных пятен с периодами от получаса до десятков часов. Эти колебания, амплитуды которых лишь немногим уступают известным 3-минутным колебаниям, согласуются с моделью «мелкого пятна», разработанной ранее и также получившей независимое подтверждение на основе анализа космических данных.

Колебания по SOHO и Нобеяма

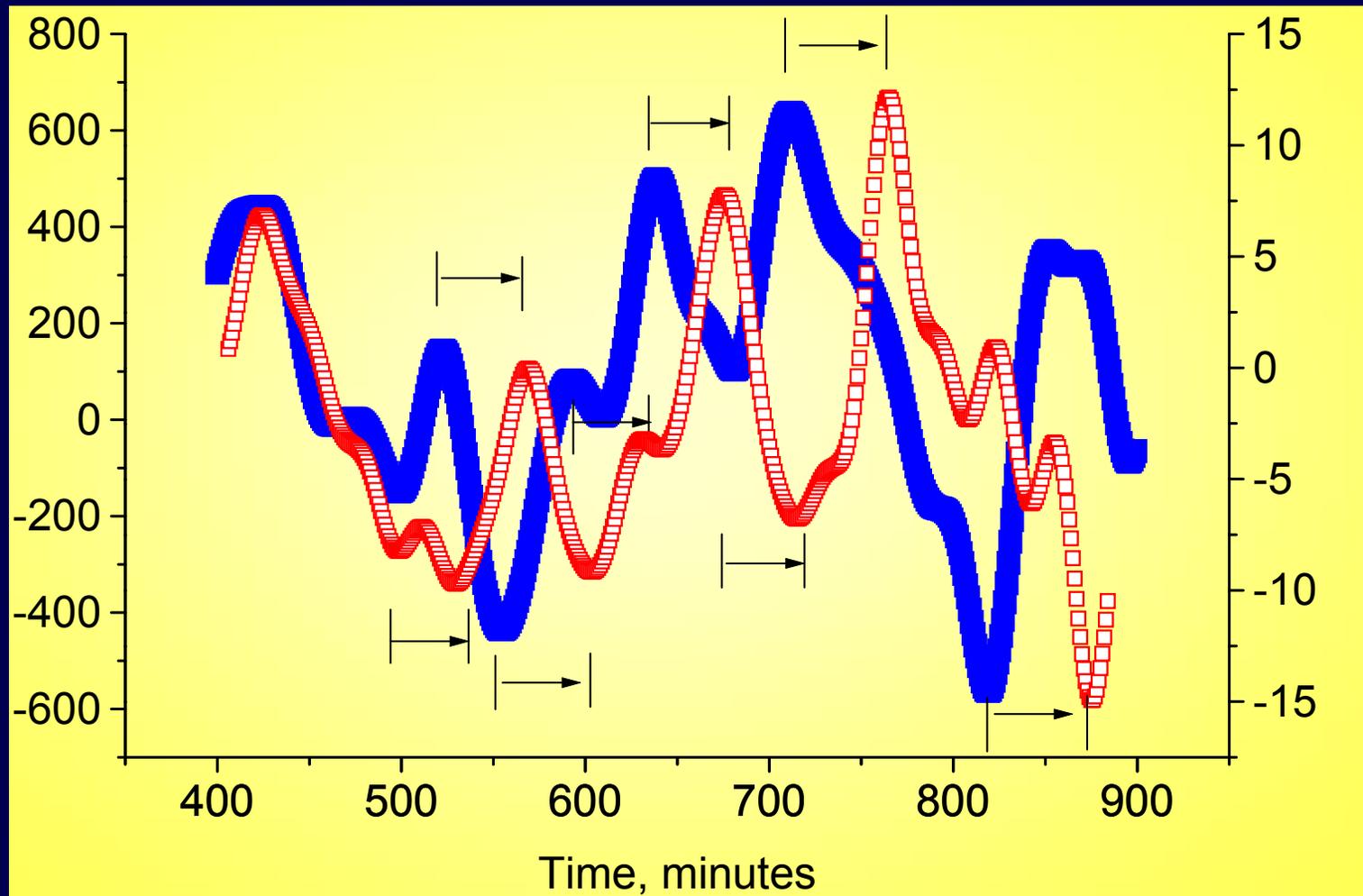


Теоретическая модель мелкого пятна:

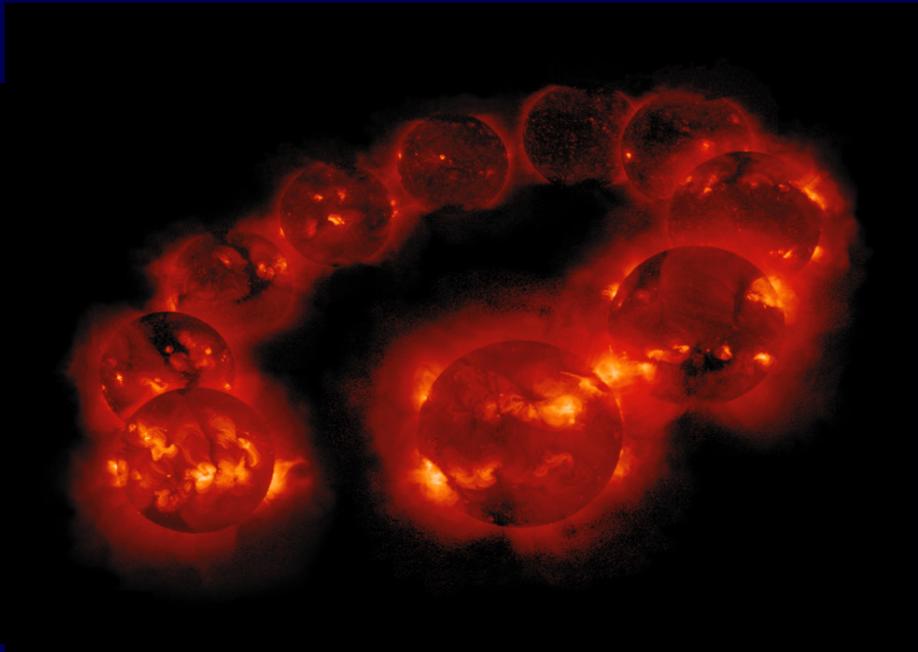
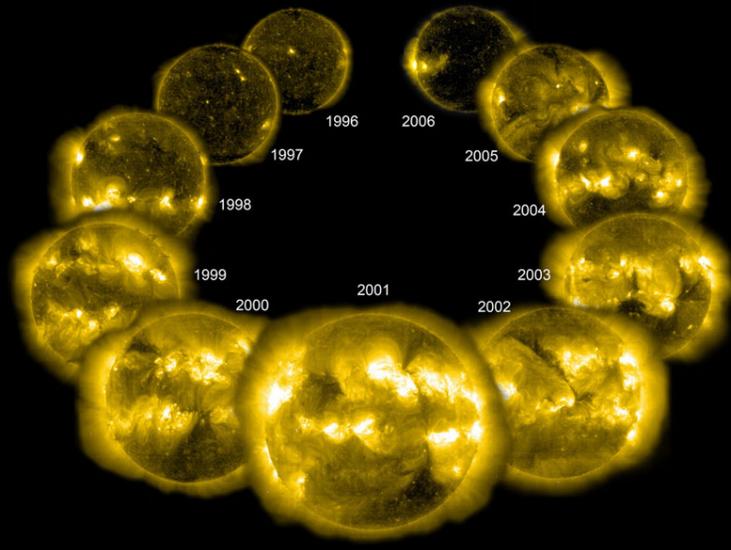
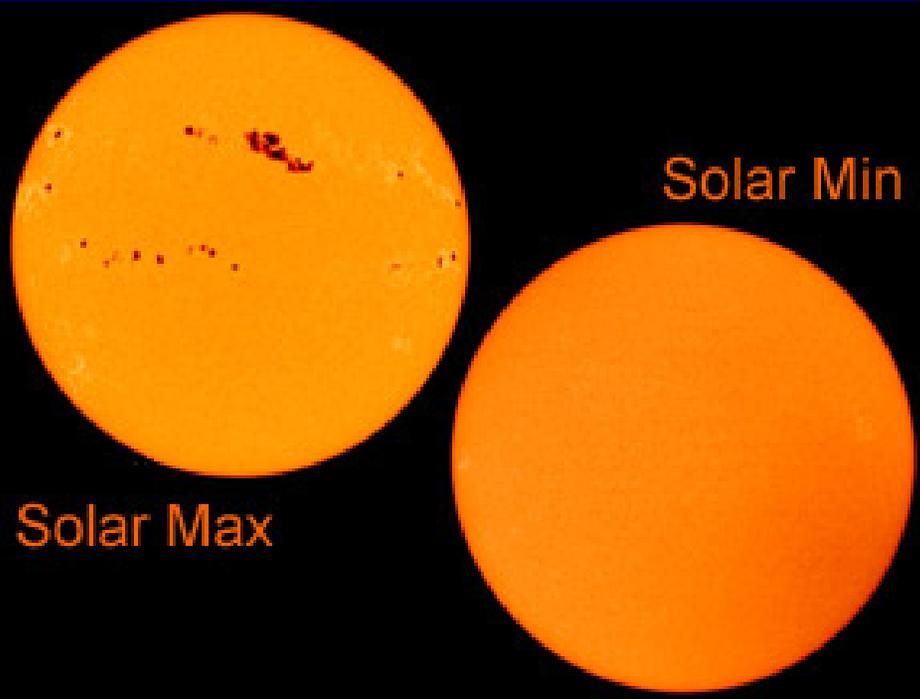
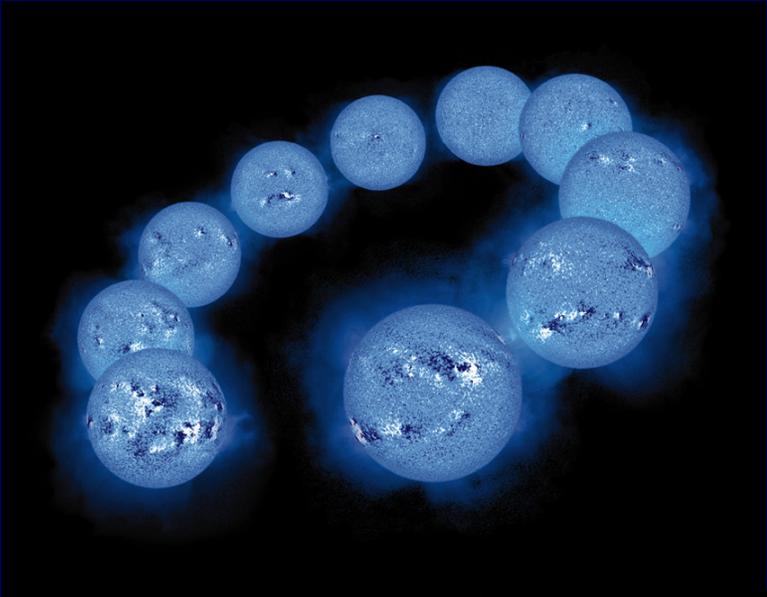


$$\Delta = 48 \pm 17 \text{ мин}$$

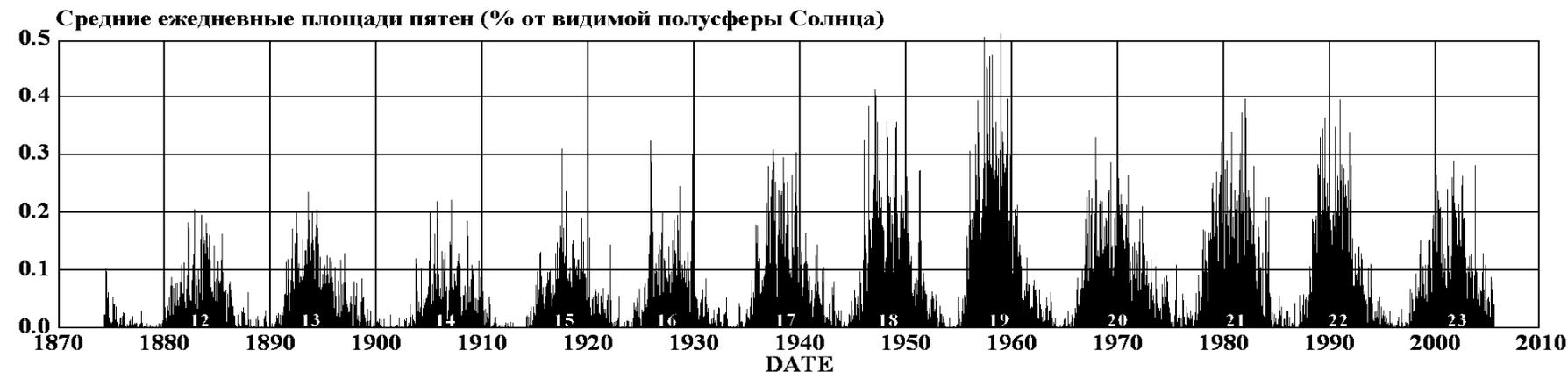
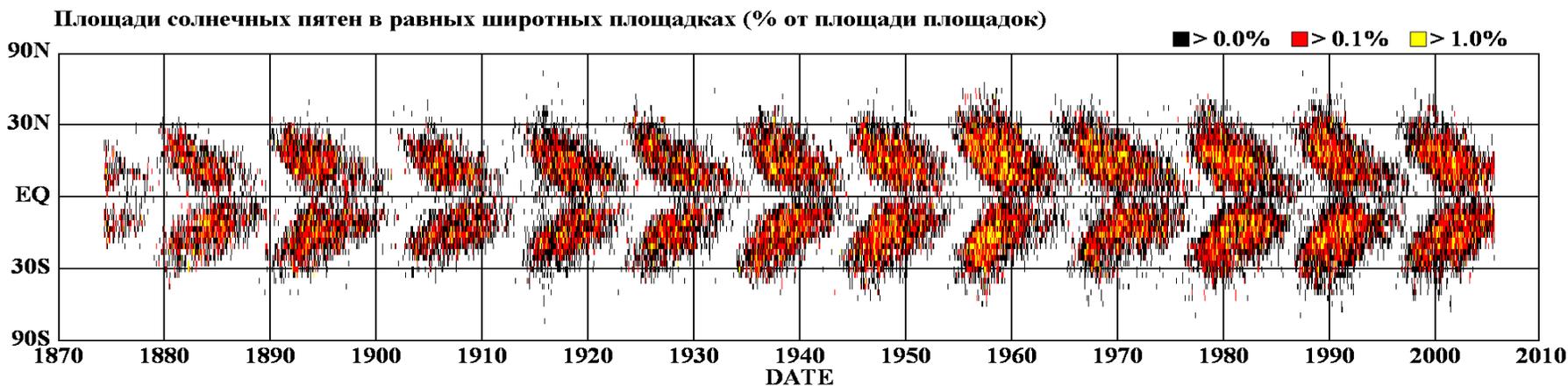
SOHO (H) и Nobeyama (I), пятно № 10



ЦИКЛЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ



В новом цикле пятна появляются далеко от экватора Солнца примерно на широте $\pm 35^\circ$ и больше. С развитием цикла пятна постепенно смещаются к экватору, в максимуме они достигают $\pm 15^\circ$ и в конце цикла $\pm 5^\circ$ (закон Шперера).



Магнитные поля от фотосферы до короны (TRACE)

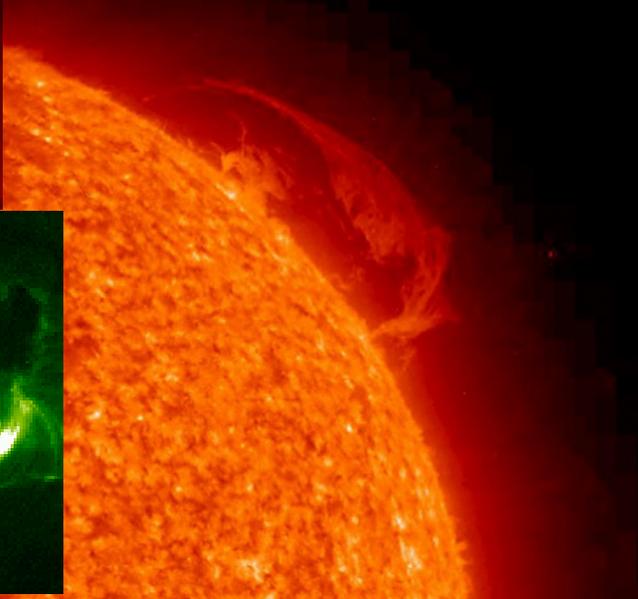
Магнитный ковер



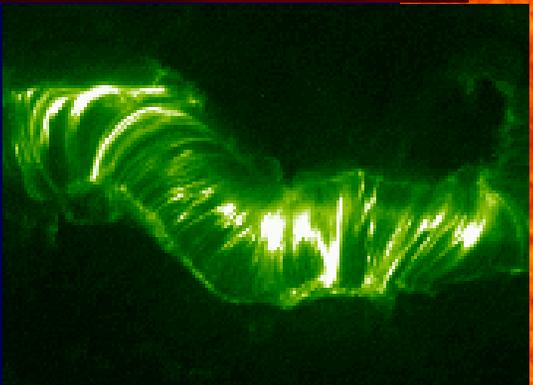
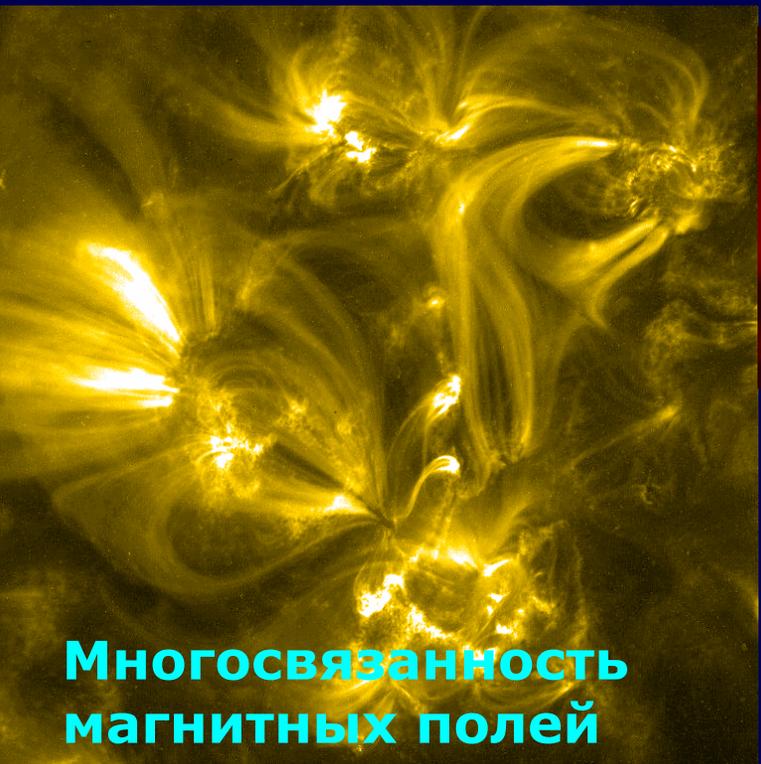
Большие и малые петли

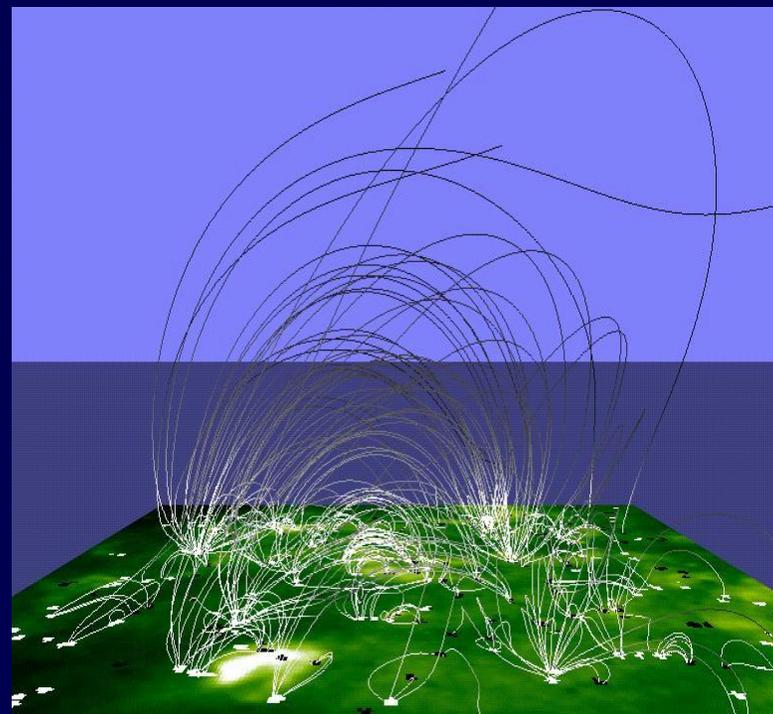
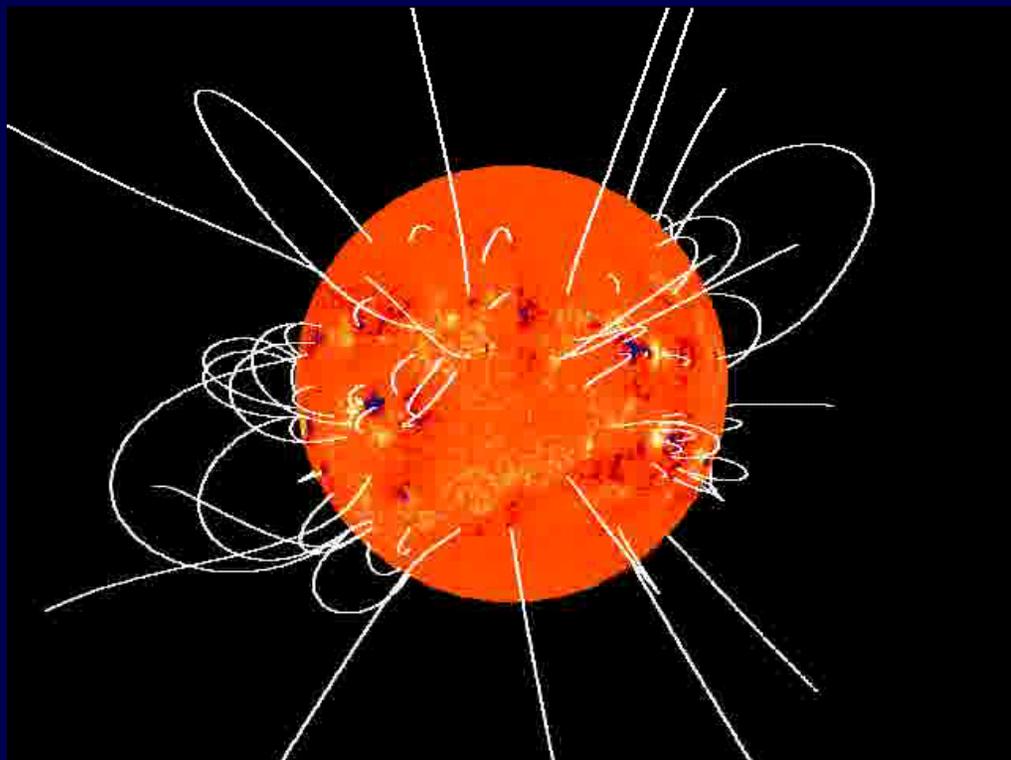


Сложная структура магнитного поля

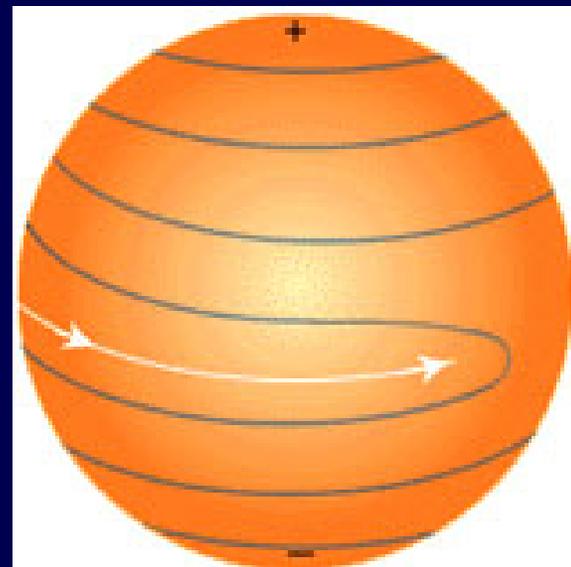
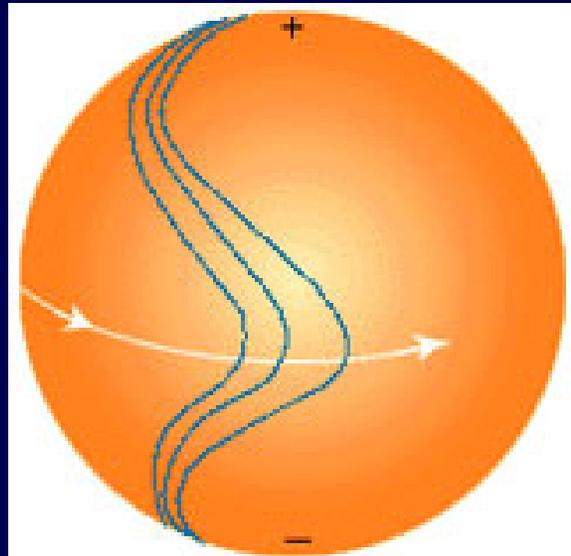
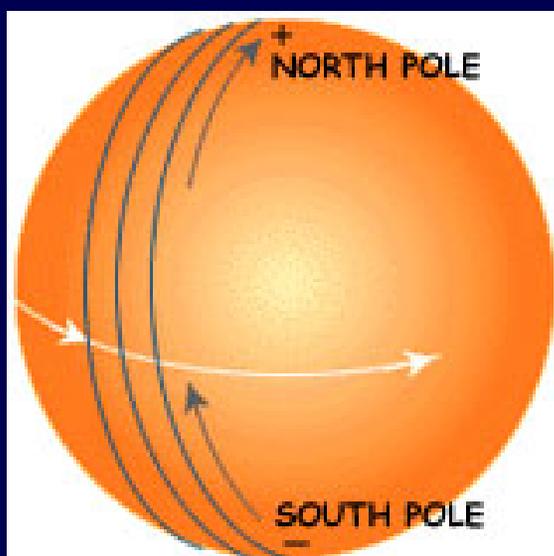


Многосвязанность магнитных полей

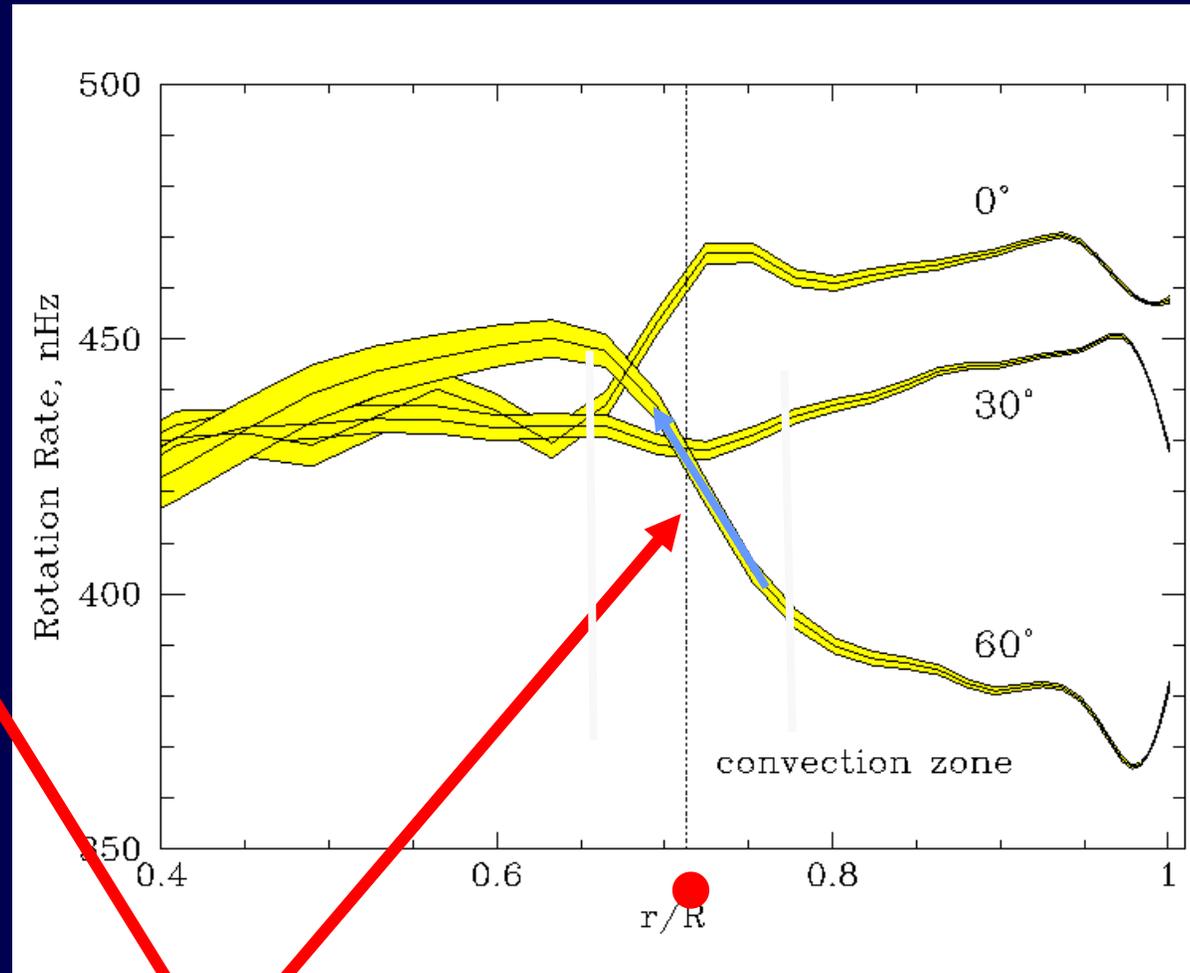
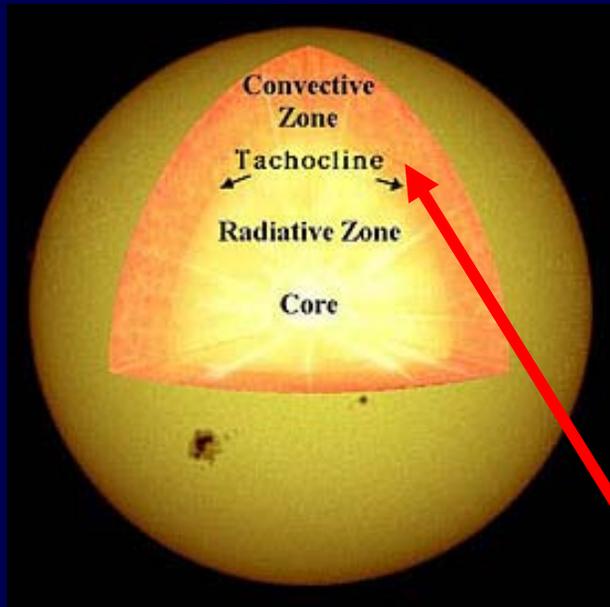




МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ НА СОЛНЦЕ

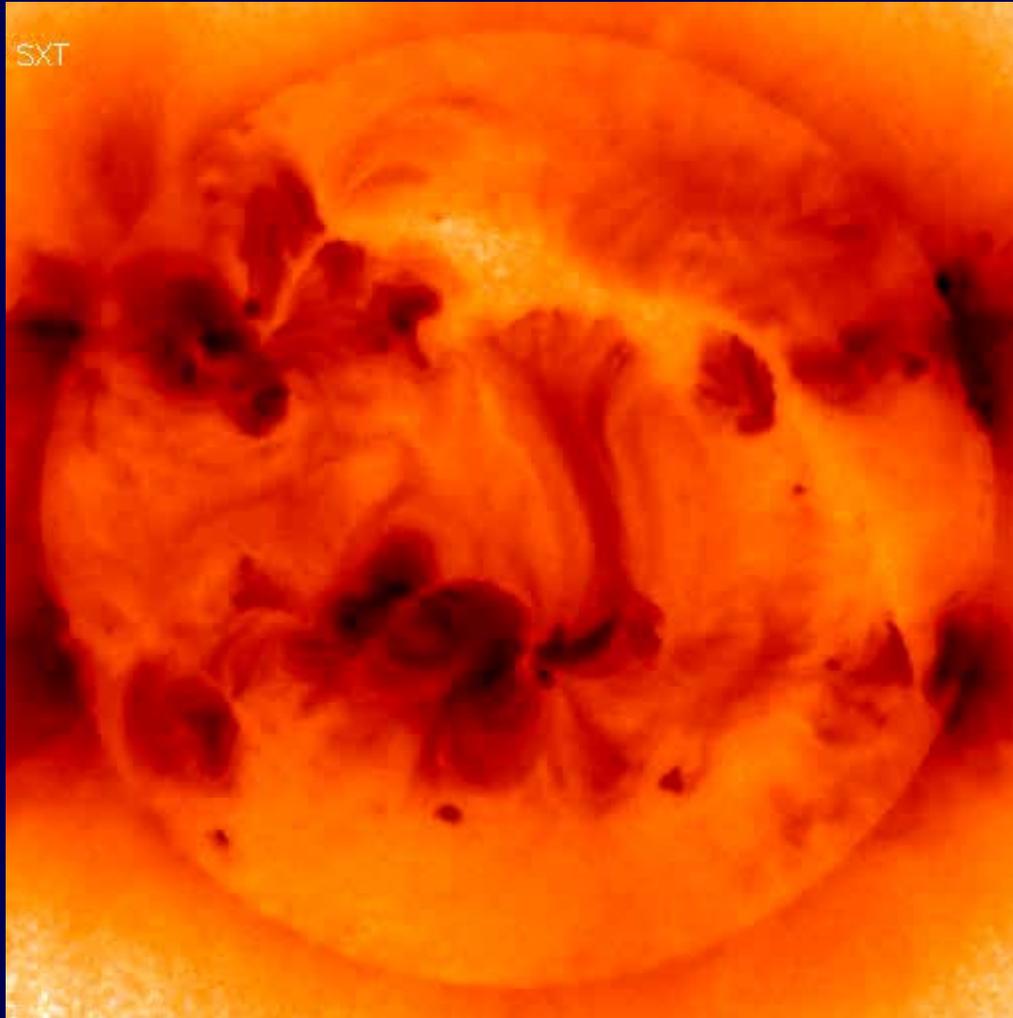


Дифференциальное вращение Солнца



Тахоклин – область большого радиального градиента угловой скорости

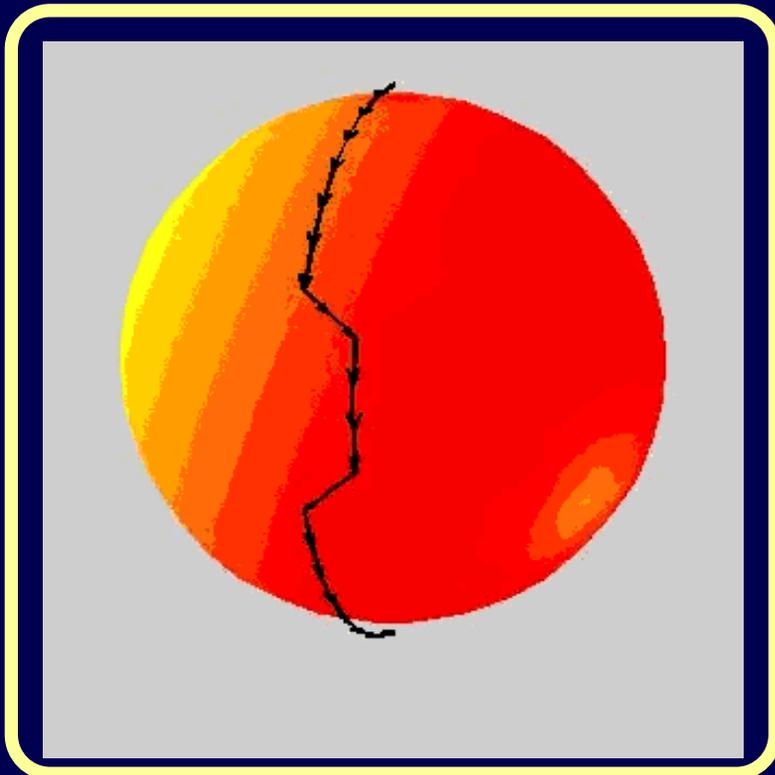
Трансэкваториальные корональные петли



Полоидальное и тороидальное поле: α - Ω динамо

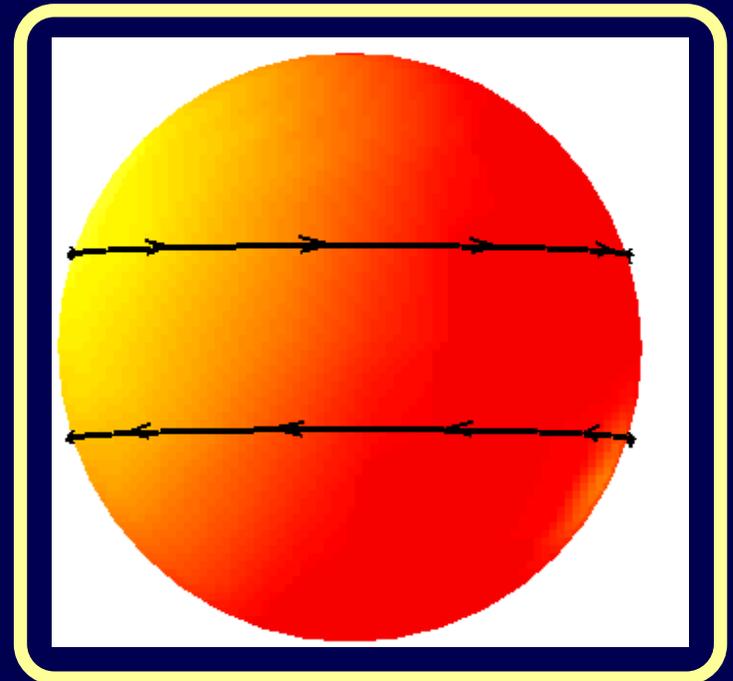
$$\mathbf{V}_P \xrightarrow{\Omega} \mathbf{V}_T$$

Дифференциальное вращение



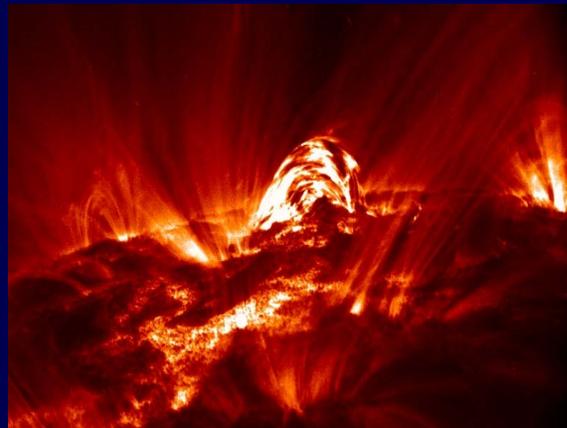
$$\mathbf{V}_T \xrightarrow{\alpha} \mathbf{V}_P$$

Спиральность

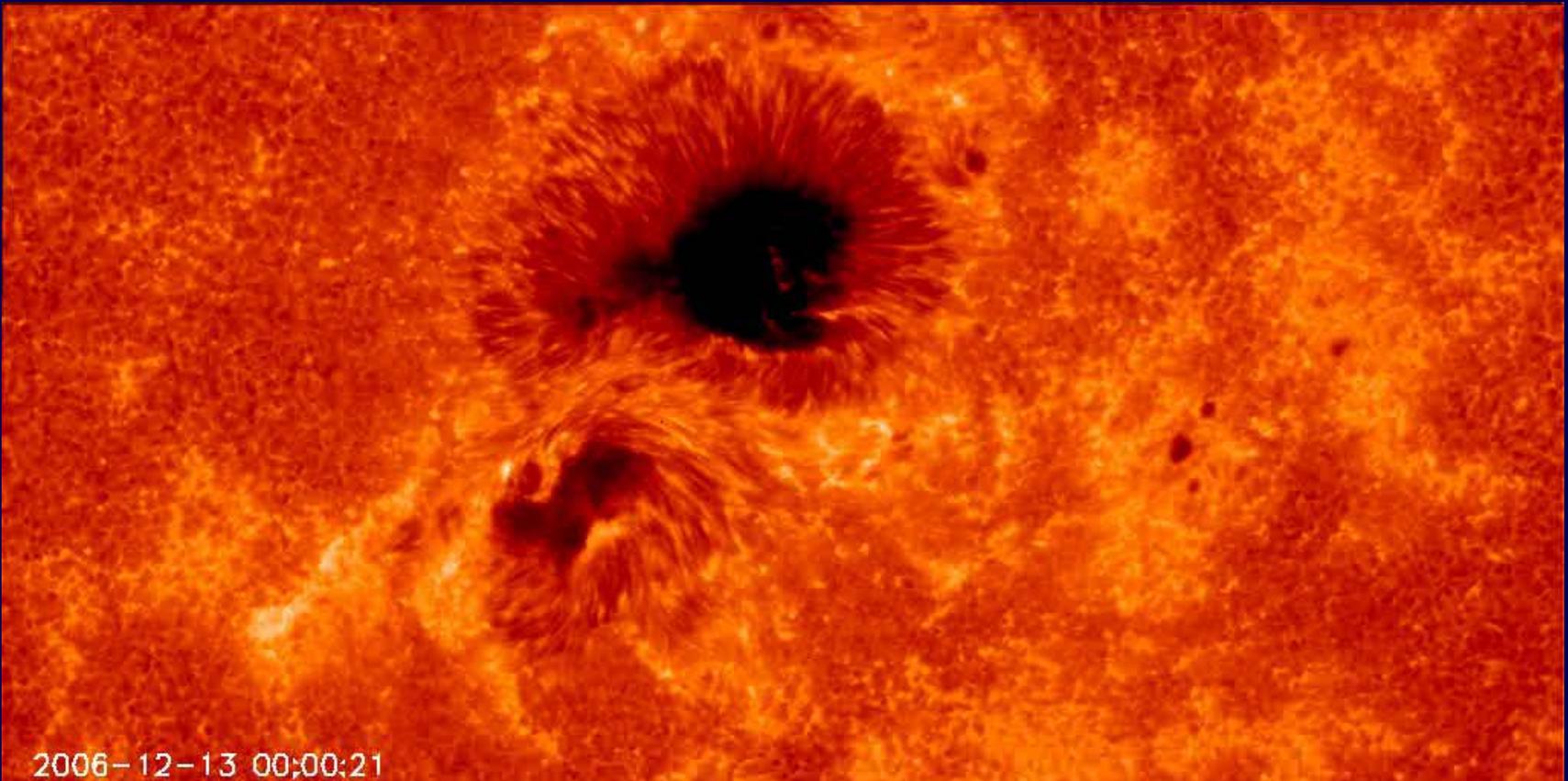


$$\alpha = \frac{\tau \langle \mathbf{v} \operatorname{rot} \mathbf{v} \rangle}{3}$$

3. Солнечная активность и космическая погода:



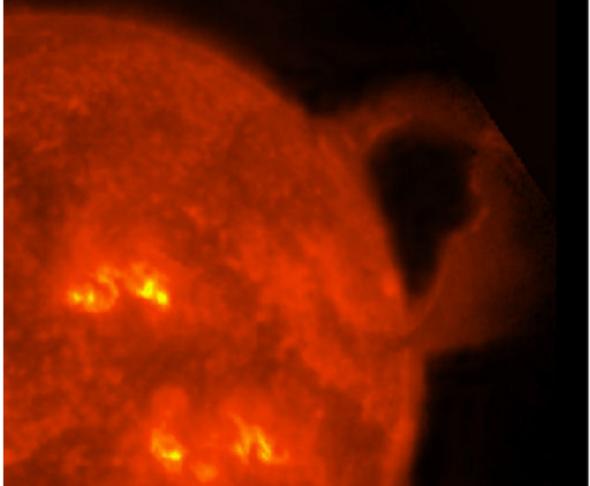
Вспышечные процессы и Космическая погода ->



Корональные выбросы массы

2004-01-21 22:11:23

КОРОНАС-Ф



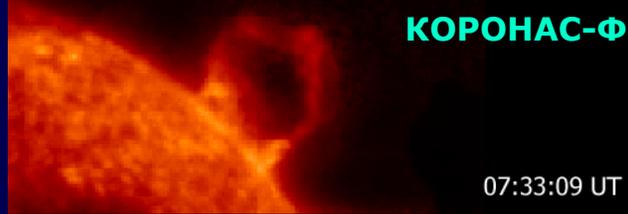
2004-01-21 23:39:35

КОРОНАС-Ф

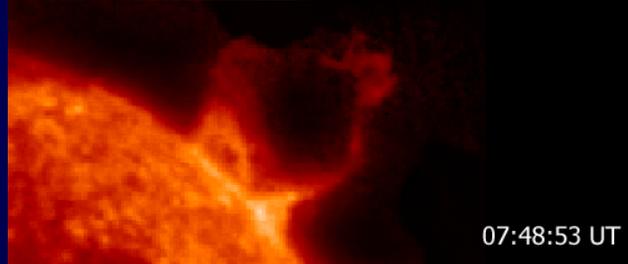


30 сентября 2002

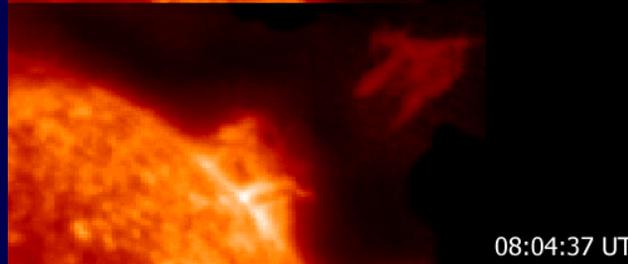
КОРОНАС-Ф



07:33:09 UT

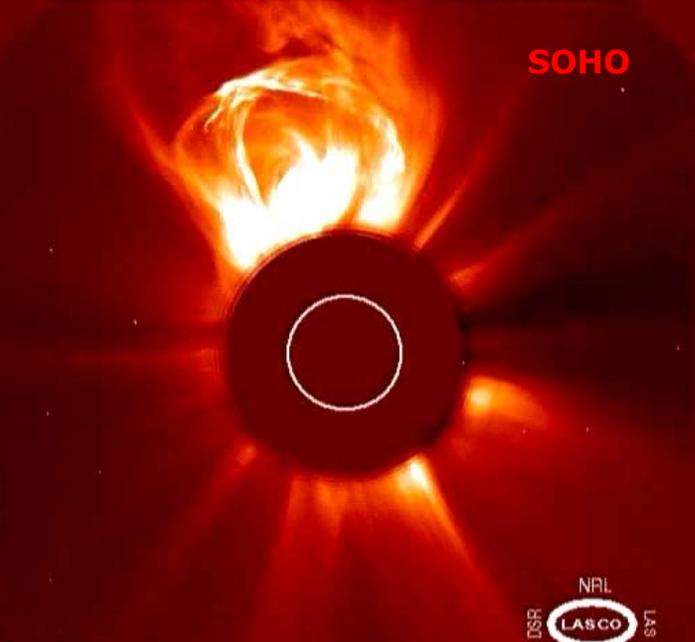


07:48:53 UT



08:04:37 UT

SOHO



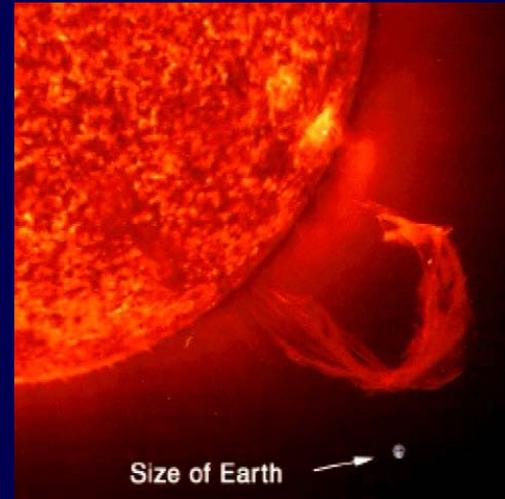
C2 2000/02/27 01:31:55



SOHO



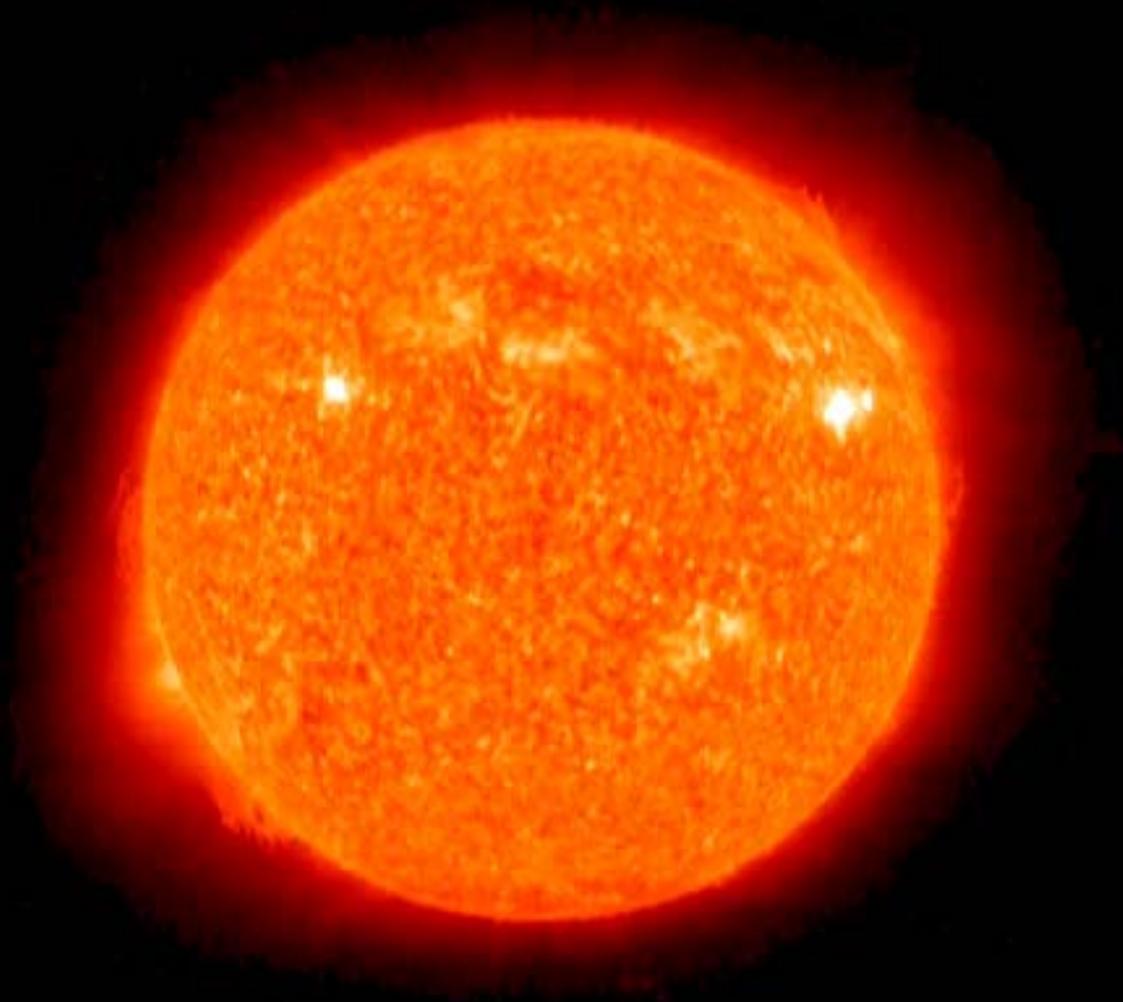
ПО Д
ИКА



Size of Earth

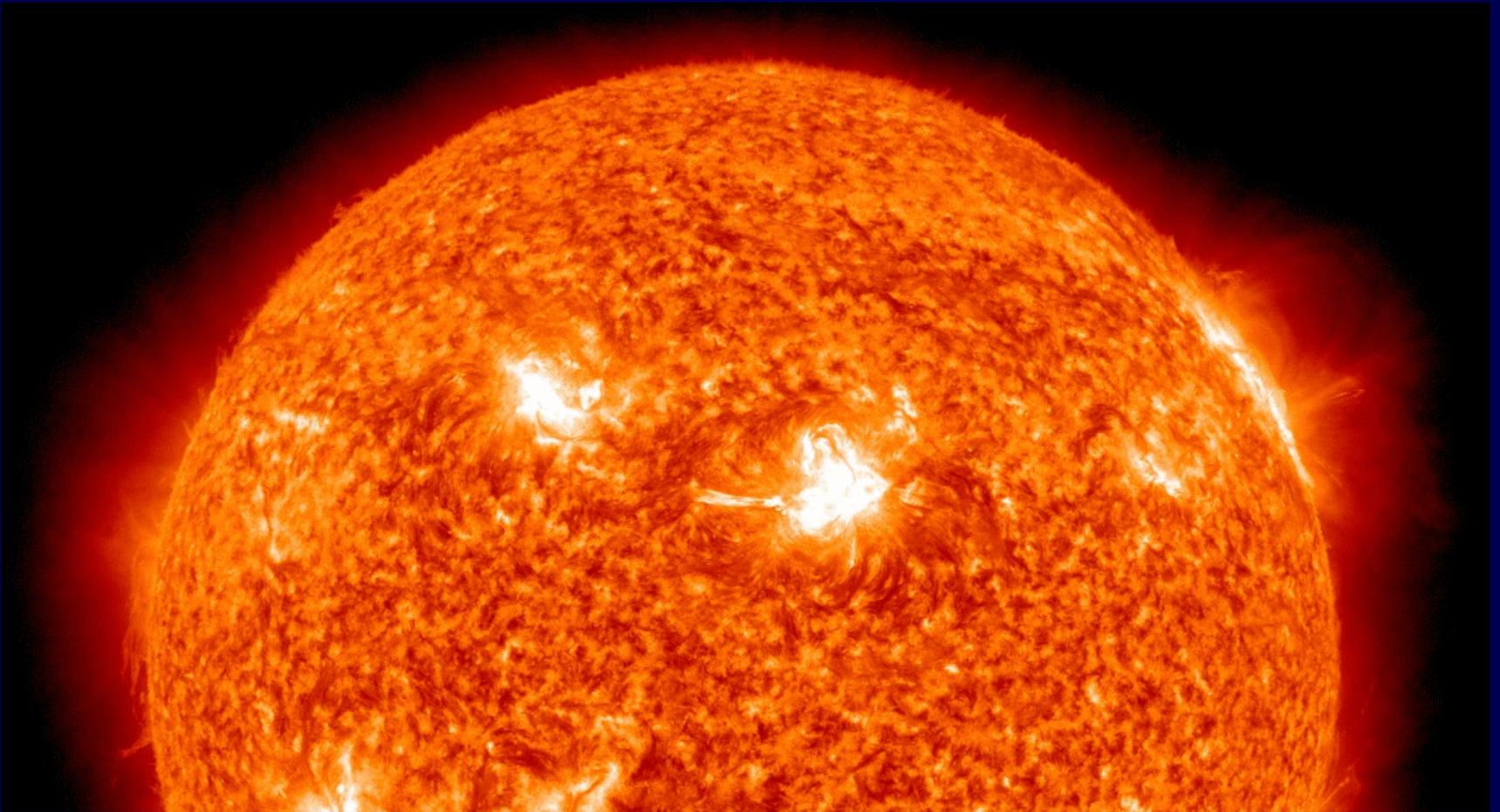
KBM:

STEREO Behind EUVI 304

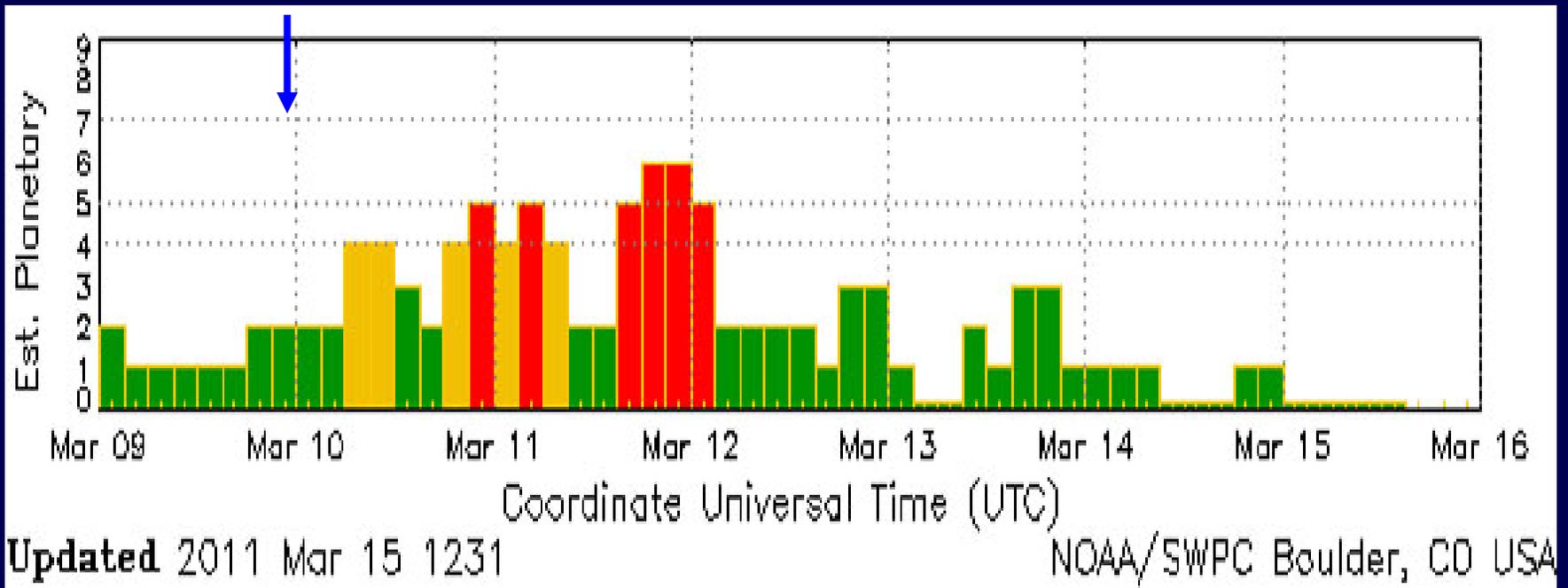


2010-03-13 15:56:36

Вспышка 9 марта 2011 (X1.5)

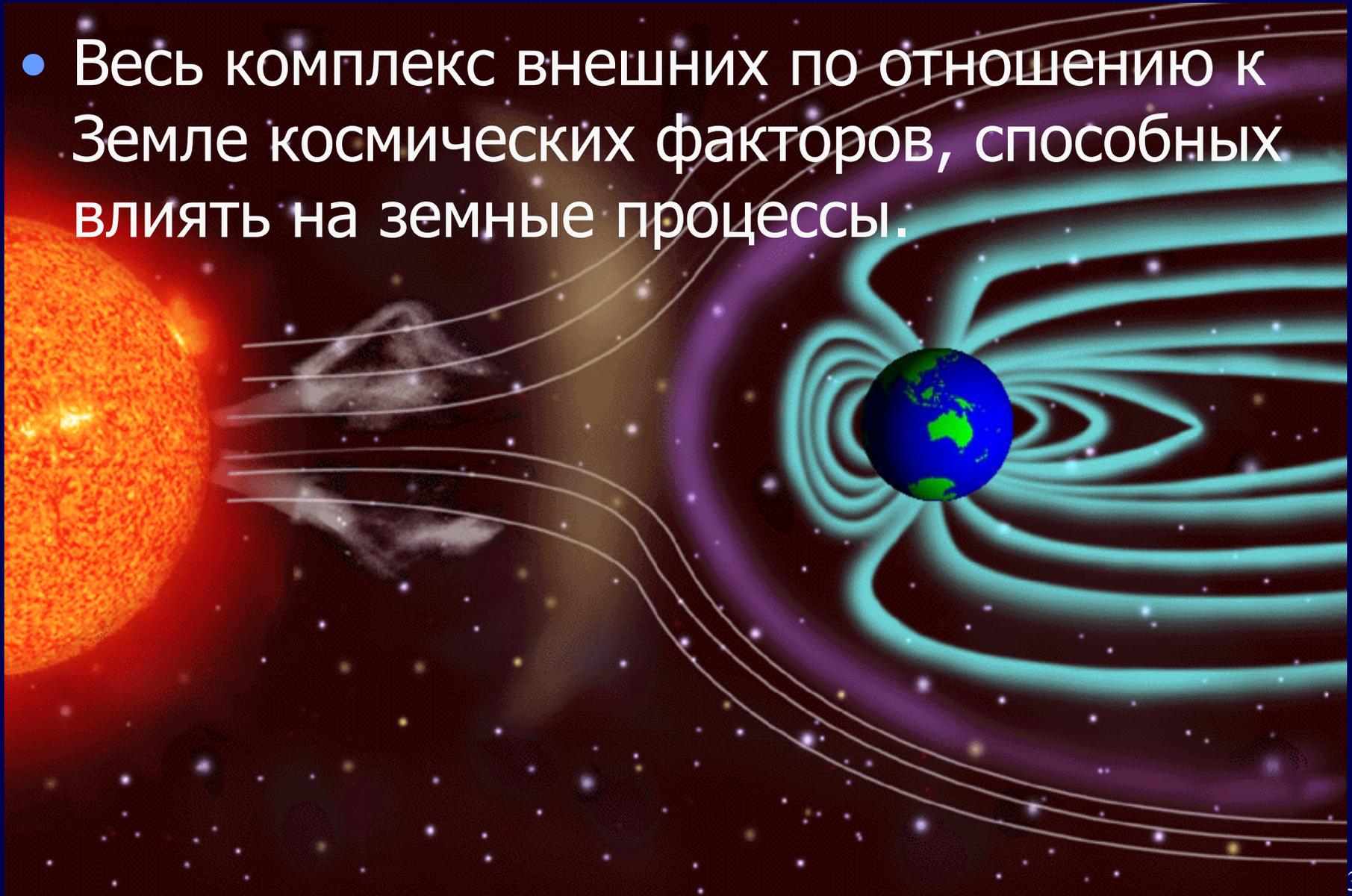


Вспышка 9 марта 2011 (X1.5): Kp – геомагнитный индекс



Космическая погода – это:

- Весь комплекс внешних по отношению к Земле космических факторов, способных влиять на земные процессы.



Последствия «космической непогоды»

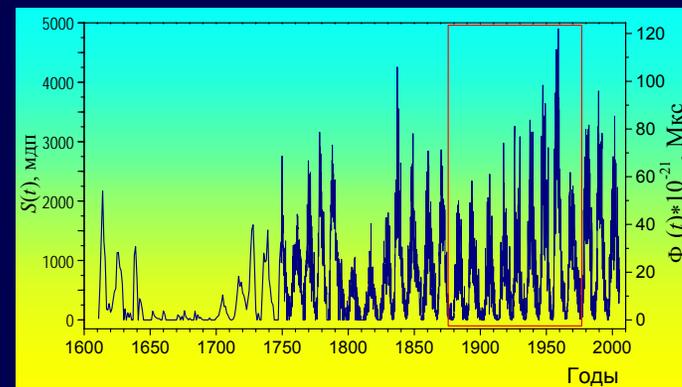
Нарушение радиосвязи—на коротких волнах полное радиомолчание, потеря радиосвязи с кораблями, подводными лодками, самолётами

Навигационные низкочастотные сигналы, использующиеся для определения местоположения судов и самолётов, спутников, пропадают

Сбои в работе приборов спутниковой ориентации могут привести к полному отключению энергоснабжения космических аппаратов

Ущерб здоровью космонавтов и даже пассажиров авиалайнеров.

4. От космической погоды к космическому климату



Обоснование

- Существует мнение о том, что наша эпоха уникальна по высокому (в среднем) уровню солнечной активности.
- Аналогичное мнение существует и о климате Земли (рекордно быстрое потепление, обусловленное техногенной деятельностью).
- Несмотря на безусловную роль техногенных факторов в современном изменении земного климата, по ряду исследований существенную роль в этих изменениях играет солнечная активность.
- Кроме 11-летнего, существуют другие долгопериодические циклы (~80-90 лет, ~200 лет, ~900 лет и больше). Их суперпозиция и определяет сложную структуру развертывания солнечной активности на большой временной шкале и последующих земных проявлений.

→ Проблема «Космический климат»

Проблема «Космический Климат» (рабочие определения):

- Долгопериодические тенденции Космической Погоды**
- Совокупность солнечно-земных связей, действующих на длительных временах**
- Совокупность внешних космических факторов, влияющих на земной климат**

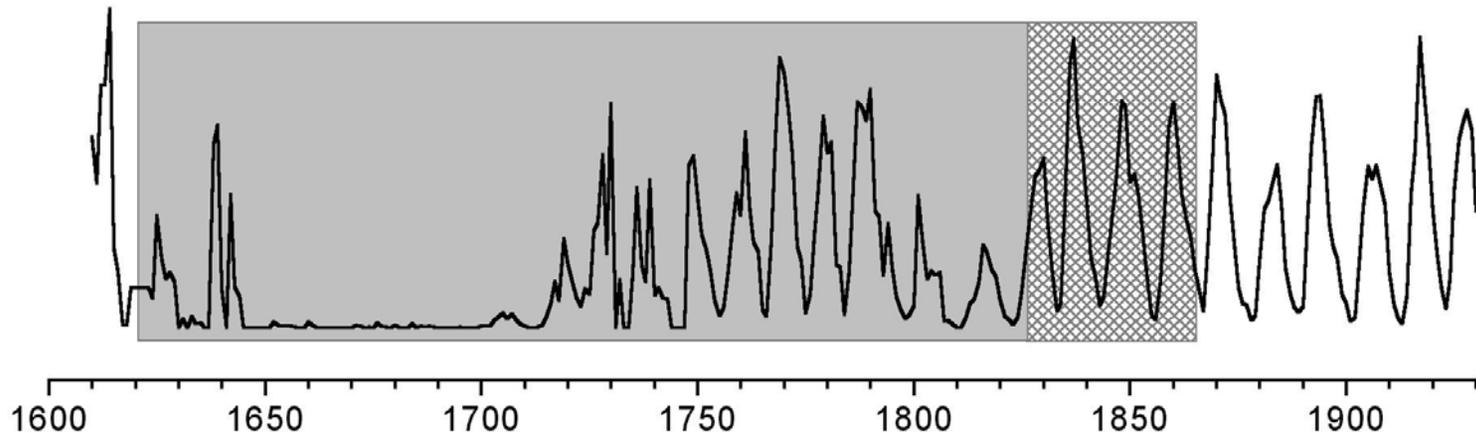
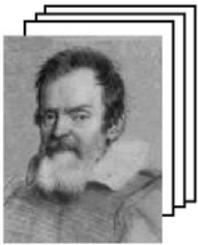
Цели

- Получение физически информативных комплексных данных о динамике солнечного магнитного поля, геомагнитного поля и ММП на больших временных масштабах.
- Качественный и количественный анализ эволюции солнечной активности на основе реконструкций поведения различных компонент магнитного поля Солнца на длительных временах.
- Исследование прогностических сценариев вариаций активности Солнца на интервале десятков - сотен лет
- Исследование связи солнечной активности и климата Земли.

Методы и подходы:

- а) Переход от традиционных статистических индексов (числа Вольфа, числа групп пятен и т.п.) к физическим параметрам (магнитный поток, напряженность поля и т.п.).
- б) Учет дифференциального характера связей между параметрами СА на различных временных масштабах. Для это предложены математические методы MSR и DPS (*Nagovitsyn et al, Solar Phys., 2004; Наговицын, ПАЖ, 2006*), основанные на вейвлет-преобразовании и разложении по псевдофазовому пространству Такенса соответственно.
- в) Стремление к максимально полному описанию процессов СА с использованием всего комплекса имеющихся данных, а не данных какого-либо одного типа («принцип свидетелей» (*Nagovitsyn et al, Solar Phys., 2004*)).

Проблема наблюдательных данных



**Солнечная активность на
различных длительных
временных шкалах:
«История Солнца»**

«История Солнца» (мультимасштабное описание поведения СА на длительных временах): **возможности реконструкций**

Временные шкалы:

- 100-150 лет – Служба Солнца
- 400 лет – инструментальные наблюдения
- 1000-2000 лет – не прямые данные (полярные сияния, пятна, видимые невооруженным глазом)
- Сверхтысячелетняя шкала (Голоцен) – ^{14}C (^{10}Be)

Реконструкция индексов солнечной активности на больших временных шкалах: связи индексов друг с другом

$$Y(t) = f(X(t))$$



$$Y(t, \omega) = f(X(t, \omega))$$

Пример: реконструкция СА по относительной концентрации радиоуглерода в естественных архивах

$$S(t) = f(n_0(t))$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{n}_0 = -kn_0 - \left(\sum_{i \neq 0} c_{0i}\right)n_0 + \sum_{i \neq 0} c_{i0}n_i + S \\ \dot{n}_1 = -kn_1 - \left(\sum_{i \neq 1} c_{1i}\right)n_1 + \sum_{i \neq 1} c_{i1}n_i \\ \dots \\ \dot{n}_m = -kn_m - \left(\sum_{i \neq m} c_{mi}\right)n_1 + \sum_{i \neq m} c_{im}n_i \end{array} \right.$$



$$a(\omega)n_0(\omega, t) + b(\omega)\dot{n}_0(\omega, t) = S(\omega, t)$$

Общие подходы к задаче реконструкции индексов солнечной активности на большой временной шкале

- MSR - Метод кратномасштабных регрессий.

Вейвлет-преобразование: $[W_\psi x](a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{ab}^* dt = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt$

$$Y = f(X_m): Y(\omega, t) = f[X_m(\omega, t)]$$

$$[WY](2^q, t) = c_0^q + c_1^q [WX_1](2^q, t) + c_2^q [WX_2](2^q, t) + \dots + c_m^q [WX_m](2^q, t)$$

- DPS – Метод разложения по компонентам псевдофазового пространства

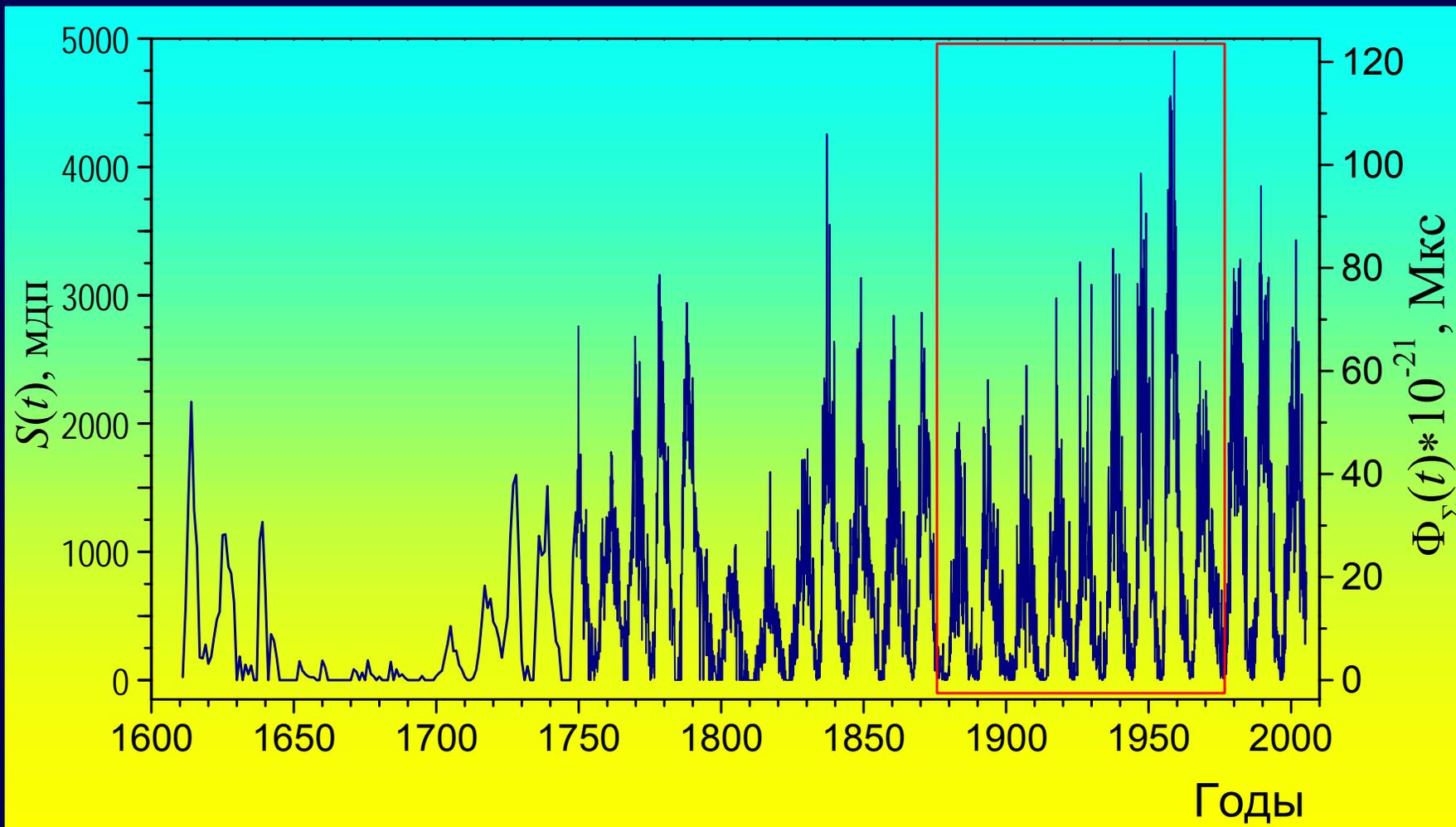
$$Y(\omega, t) = f[X(\omega, t)]$$

$$\{X(t), X(t-\Delta), X(t+\Delta), \dots, X(t-(n-1)\Delta/2), X(t+(n-1)\Delta/2)\}$$

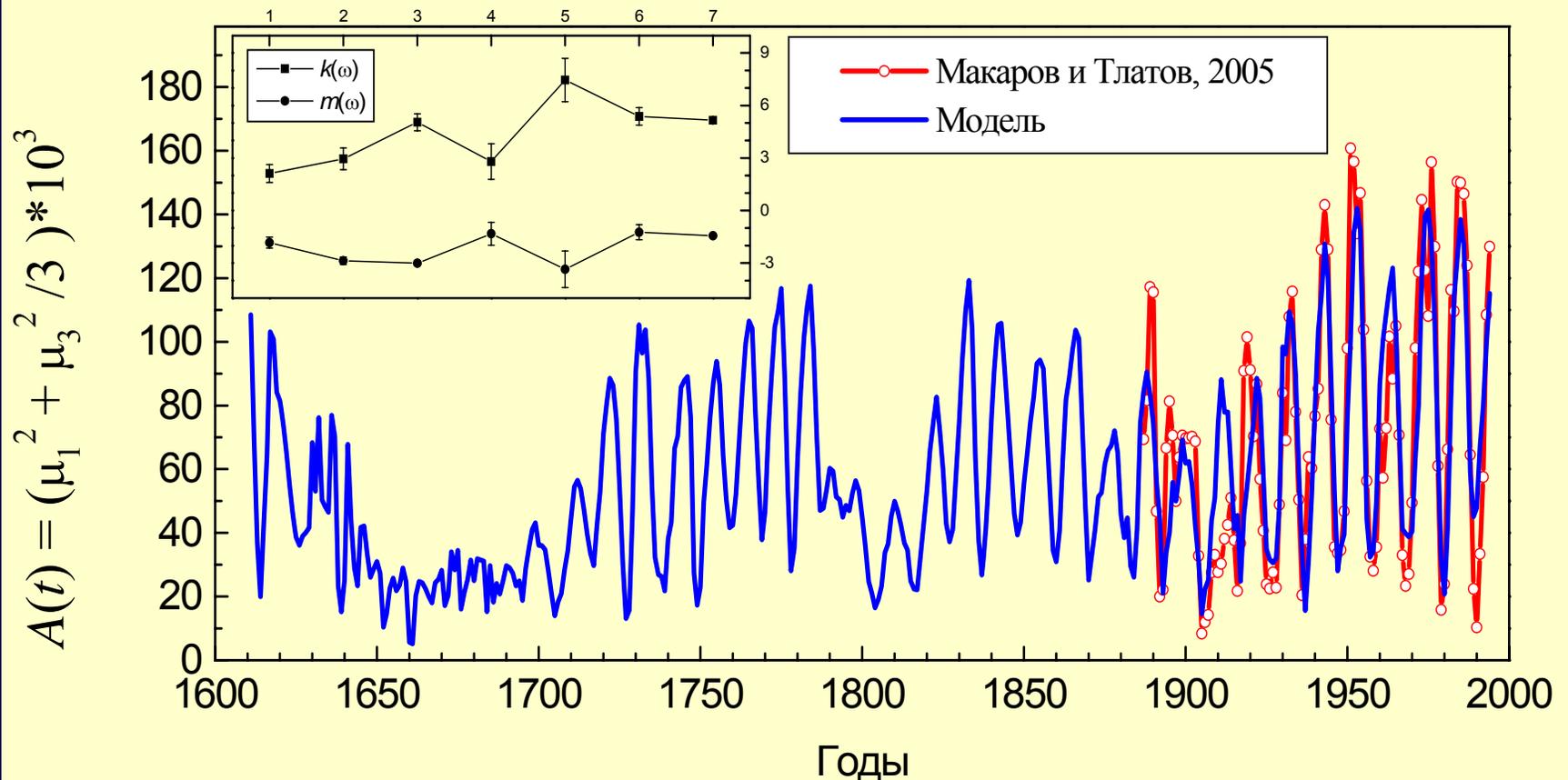
$$Y(t) = Y_0 + a_1 X(t) + a_2 X(t-\Delta) + a_3 X(t+\Delta) + \dots + a_{n-1} X(t-(n-1)\Delta/2) + a_n X(t+(n-1)\Delta/2)$$

Ref: Nagovitsyn Yu.A. et al - Solar Physics, 224, 2005.

Ряд суммарного пятенного магнитного потока $\Phi_{\Sigma}(t)$ на 400-летней временной шкале



Ряд индекса крупномасштабного магнитного поля $A(t)$ на 400-летней временной шкале



Среднегодовые данные на тысячелетней шкале: «Нелинейная версия W»

Ref: Nagovitsyn Yu.A. A nonlinear mathematical model for the Solar cyclicity and prospects for reconstructing the Solar activity in the Past.// Astronomy Letters. Vol.23. No.6. PP.742-748. 1997.

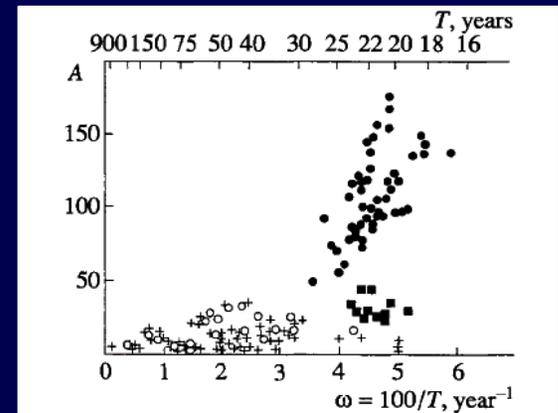
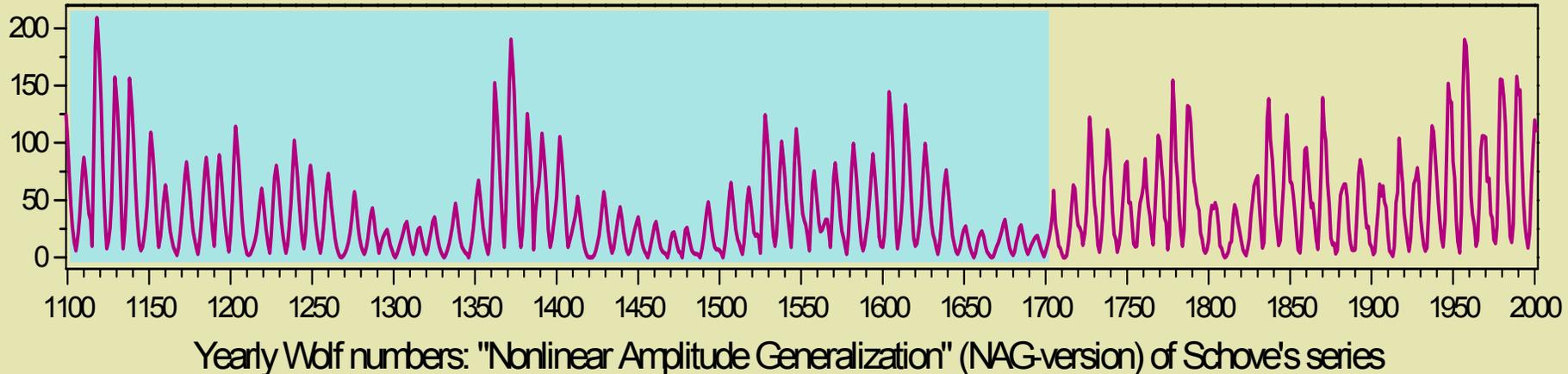
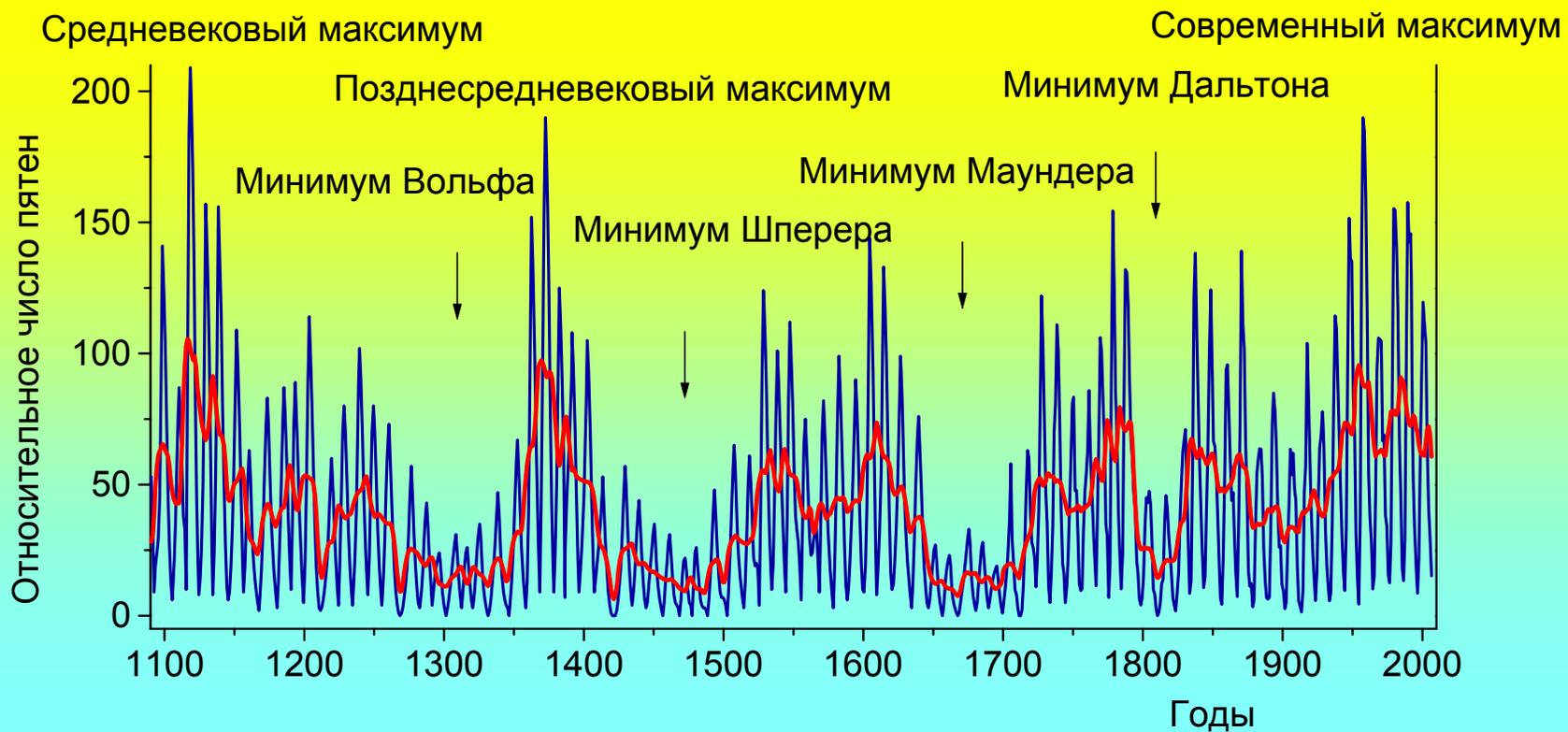


Fig. 4. Amplitude–frequency diagram for the solar cyclicity.



Грандиозные экстремумы солнечной активности



«Свидетели» поведения солнечной активности в последние два тысячелетия

SONE —

Солнечные пятна, замеченные невооруженным глазом

CARS — Вариации концентрации радиокарбона по Стюйверу

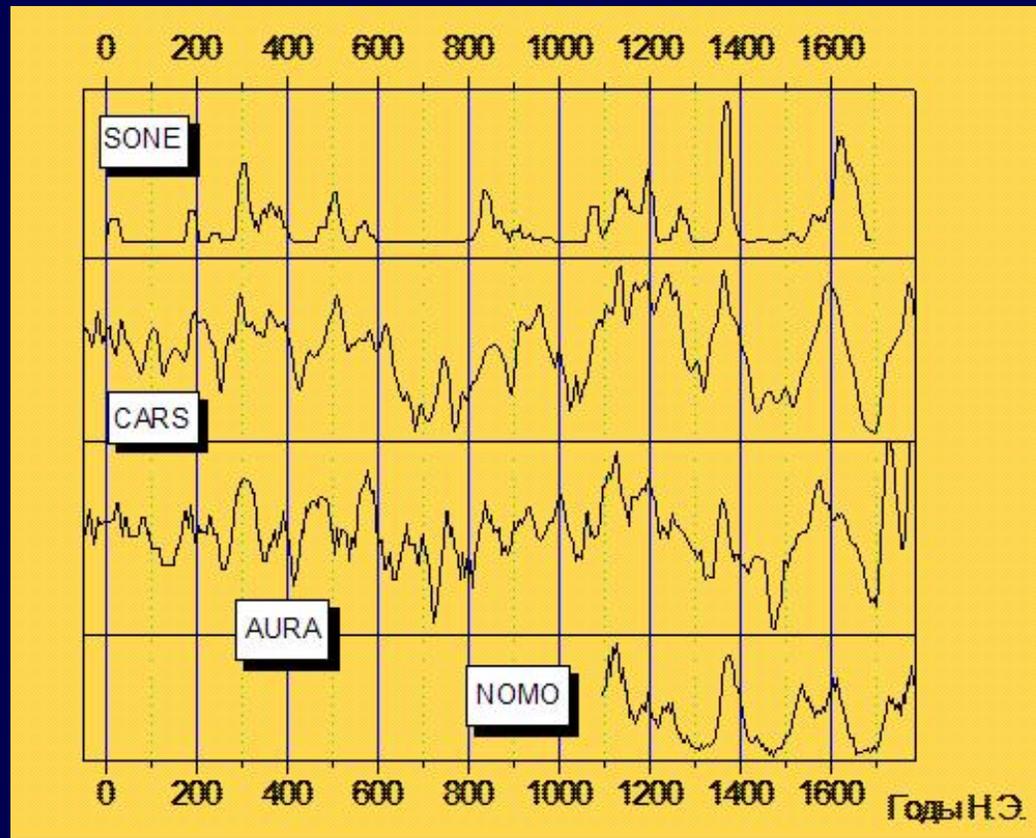
AURA —

Полярные сияния

NOMO —

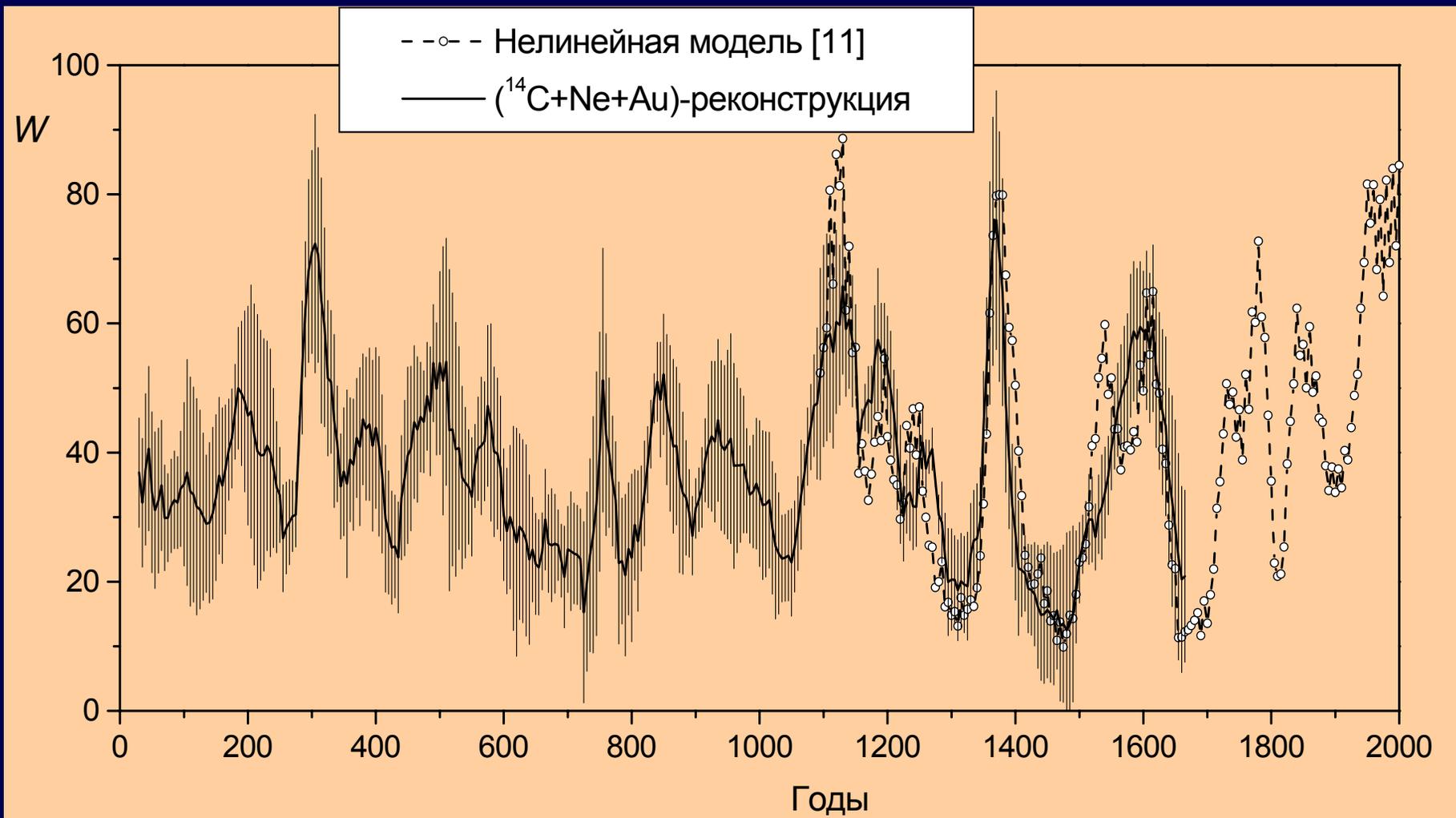
Нелинейная модель (Schove-Nag)

И др.: 10Be, археомагнитные данные ...

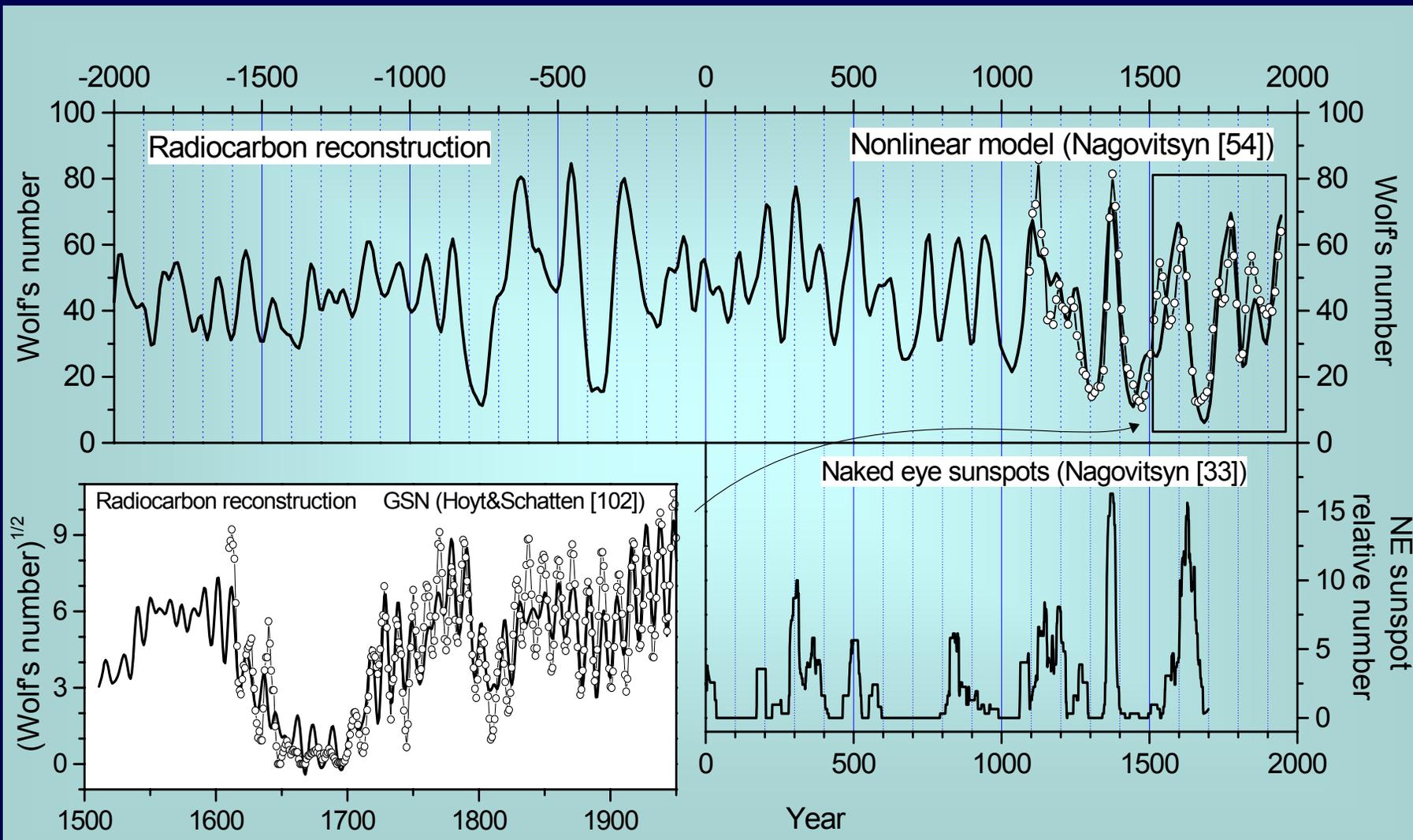


«Принцип свидетелей»: только на основе сравнения различных данных можно говорить о надежности реконструкций

Двухтысячелетняя шкала: MSR-метод + принцип свидетелей



Сверхтысячелетняя шкала: MSR-метод





<http://www.gao.spb.ru/english/database/esai/>

Результаты реконструкции поведения СА на различных временных шкалах:

Extended time series of Solar Activity Indices (ESAI) – база

данных о солнечной активности (СА), включающая, в частности, новые временные ряды для изучения изменений солнечного магнитного поля и его влияния на Землю на длительных временах.

Contact address: nag@gao.spb.ru (Dr. Yury Nagovitsyn)
Russian Academy of Sciences, Central astronomical observatory at Pulkovo.
Pulkovskoe shosse, 65/1, Saint-Petersburg, 196140,
Russia

Extended time series of Solar Activity Indices (observational, synthetic and simulated data)

→ [Readme](#)

→ [GRAPHICS](#)

→ ASCII FILES

– *Observational sets*

- ◆ [monthly sunspot areas \(Greenwich general system\), 1821-1989](#)
- ◆ [yearly sunspot areas \(Greenwich general system\) for N- and S- hemispheres, 1821-1994](#)
- ◆ [yearly mean latitudes of sunspots for N- and S- hemispheres, 1854-1985](#)

– *Synthetic set*

- ◆ [yearly polar faculae numbers \(Mt. Wilson general system\) for N- and S- hemispheres, 1837-1999](#)

– *Simulated sets*

- ◆ [yearly Wolf numbers \(Zurich-International general system\), 1090-2002](#)
- ◆ [yearly polar faculae numbers \(Mt. Wilson general system\), 1705-1999](#)



Supported by grants:

INTAS 2000-0752 "Key parameters of Space Weather",
INTAS 2001-0550 "The Solar-terrestrial climate link in the past millennia and its influence on future climate",
and partly – Federal Scientific and Technical Program "Astronomy-1105",
Program of Presidium of Russian Academy of Sciences "Non-stationary phenomena in astronomy",
Program Division for Physical Sciences of RAS No 16 "Solar Wind",
and Russian Fund for Basic Researches No 01-07-90289.

Основной результат разд. 4:

Произведена реконструкция поведения основных физических параметров Космической Погоды на 400-летней – 1610-2005 гг. – временной шкале (база данных RSW-400), включающая в себя:

- полный пятенный магнитный поток Солнца
- открытый магнитный поток Солнца
- диполь-октупольный индекс крупномасштабного магнитного поля
- *aa*- и *IDV*-индексы геомагнитной возмущенности
- напряженность межпланетного магнитного поля

Произведены также реконструкции на более длительных временных шкалах вплоть до 10 тыс. лет.

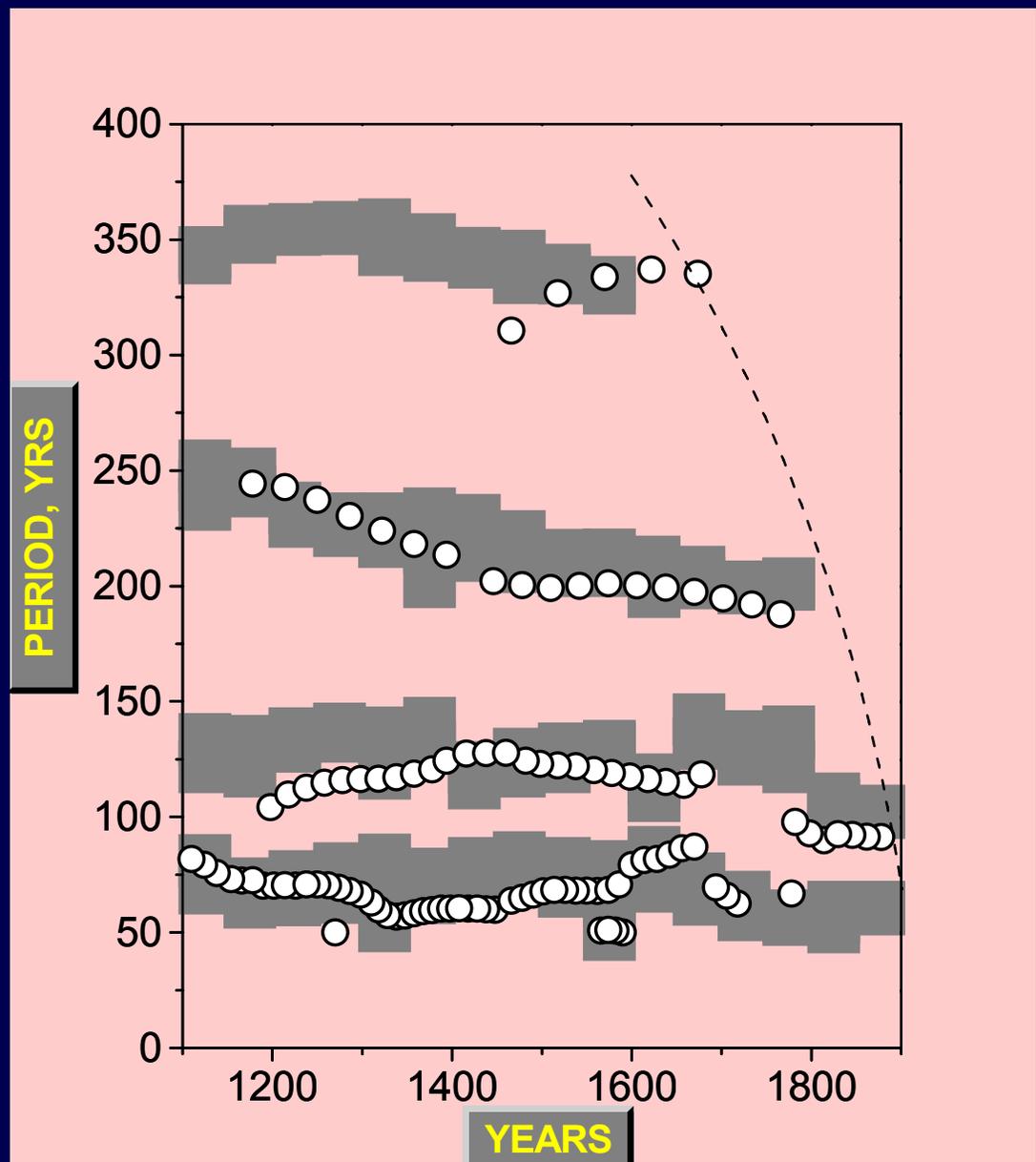
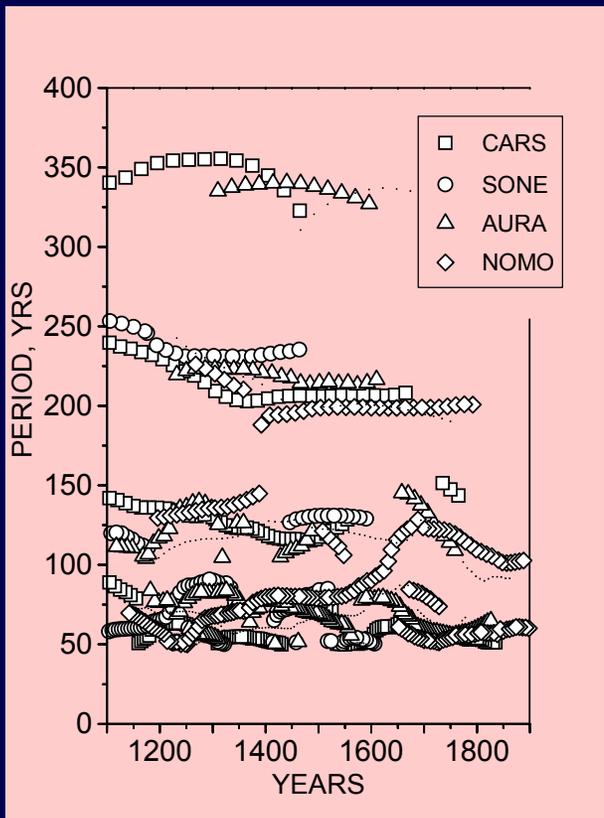
5. Солнечная активность и климат Земли

Климатообразующие факторы:

- Атмосфера
- Гидросфера
- Литосфера
- Криосфера
- Биосфера
- Солнце (светимость, солнечная активность)



Долгопериодические изменения СА и климата Земли



Ref: Nagovitsyn Yu.A. et al - Solar Physics, 224, 2005.

Задача в рамках проблемы «Космический Климат»:

- Каков вклад солнечной активности в изменения климата?

Подход:

$$T(t) = f(S(t))$$



$$T(t, \omega) = f(S(t, \omega))$$

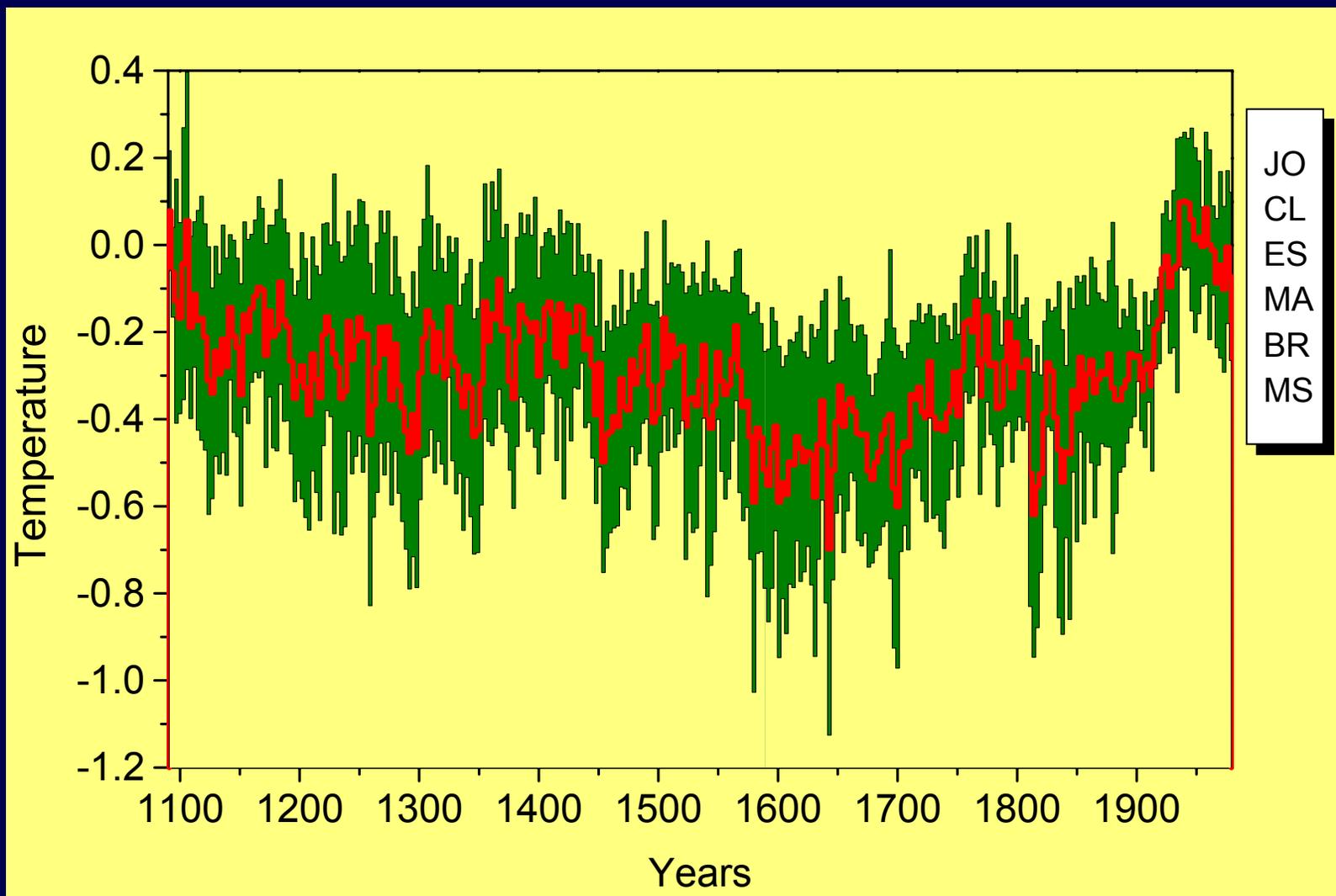
$$\begin{cases} \dot{n}_0 = -kn_0 - \left(\sum_{i \neq 0} c_{0i}\right)n_0 + \sum_{i \neq 0} c_{i0}n_i + S \\ \dot{n}_1 = -kn_1 - \left(\sum_{i \neq 1} c_{1i}\right)n_1 + \sum_{i \neq 1} c_{i1}n_i \\ \dots \\ \dot{n}_m = -kn_m - \left(\sum_{i \neq m} c_{mi}\right)n_1 + \sum_{i \neq m} c_{im}n_i \end{cases}$$

Модель:

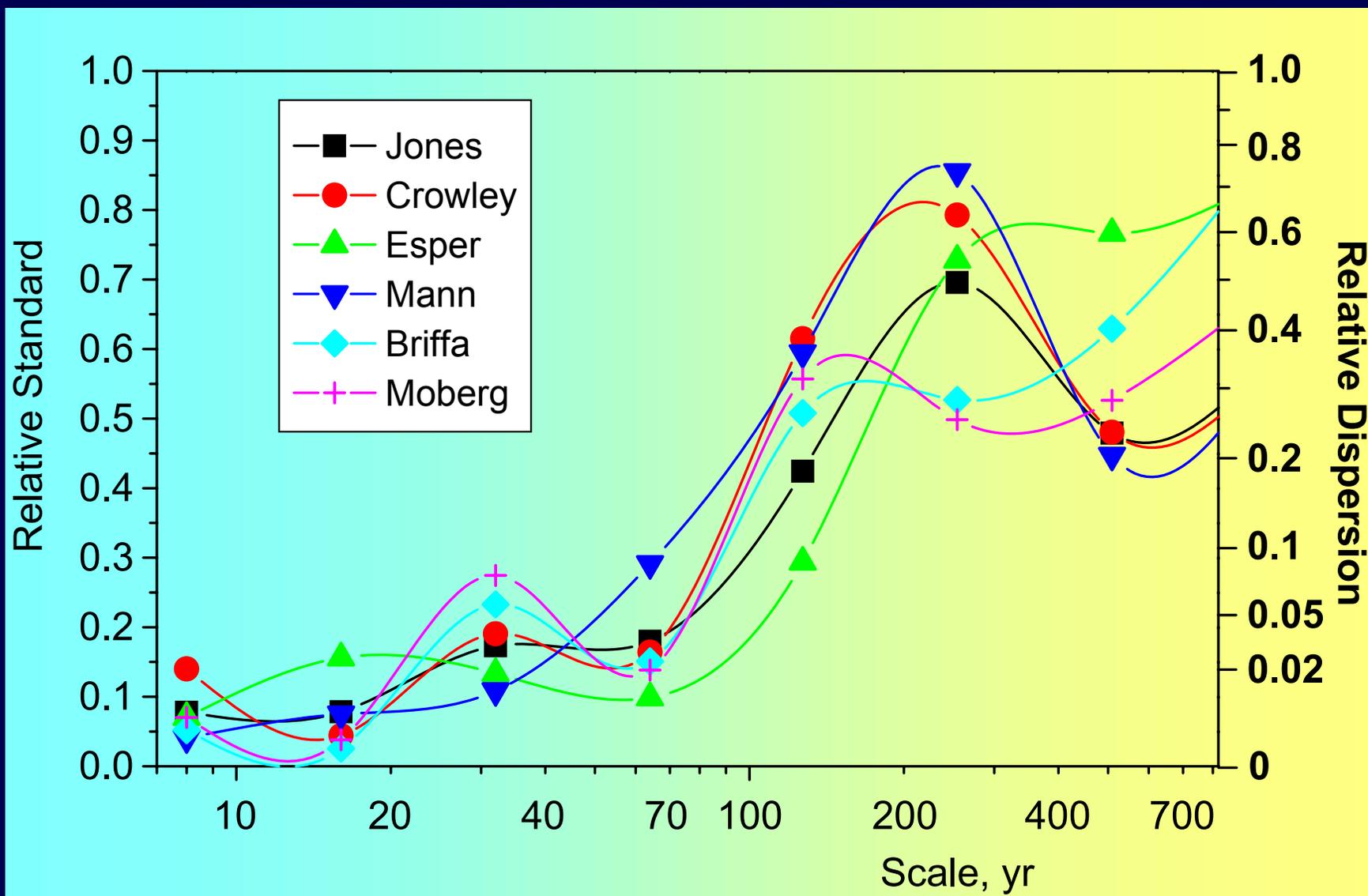


$$a(\omega)S(\omega, t) + b(\omega)\dot{S}(\omega, t) = T(\omega, t)$$

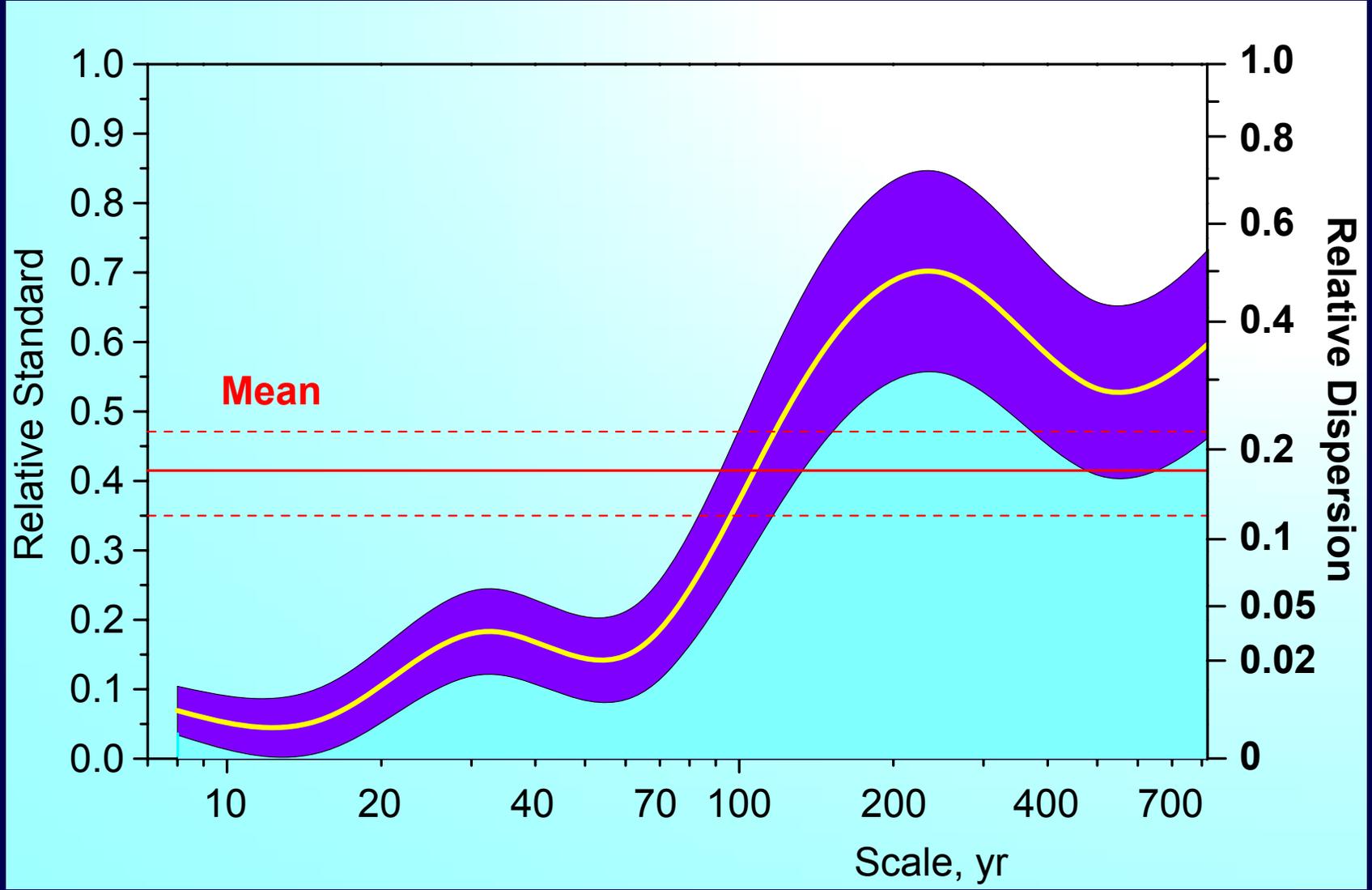
Шесть тысячелетних моделей климата



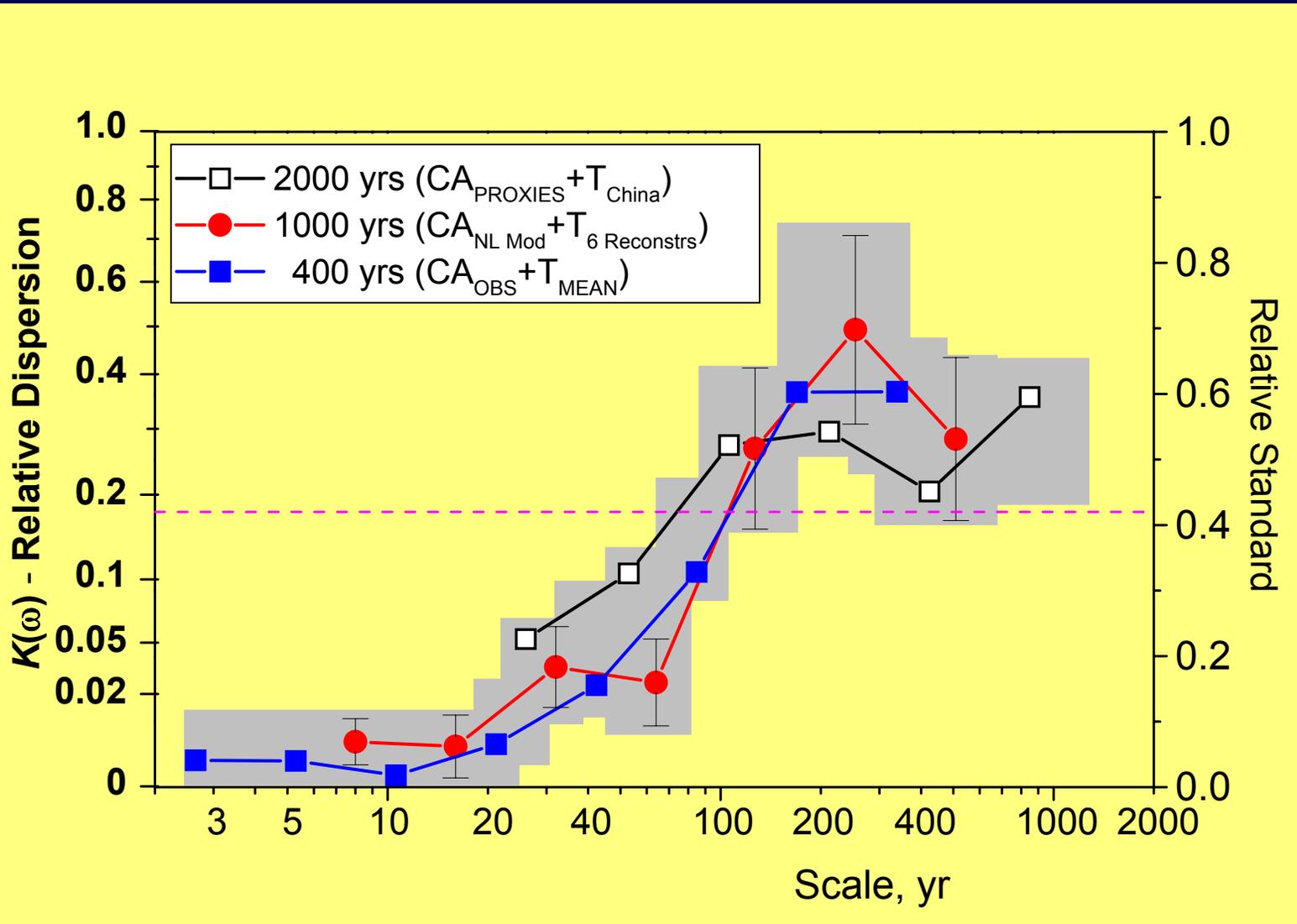
Вклад в изменения климата солнечной активности для разных временных шкал



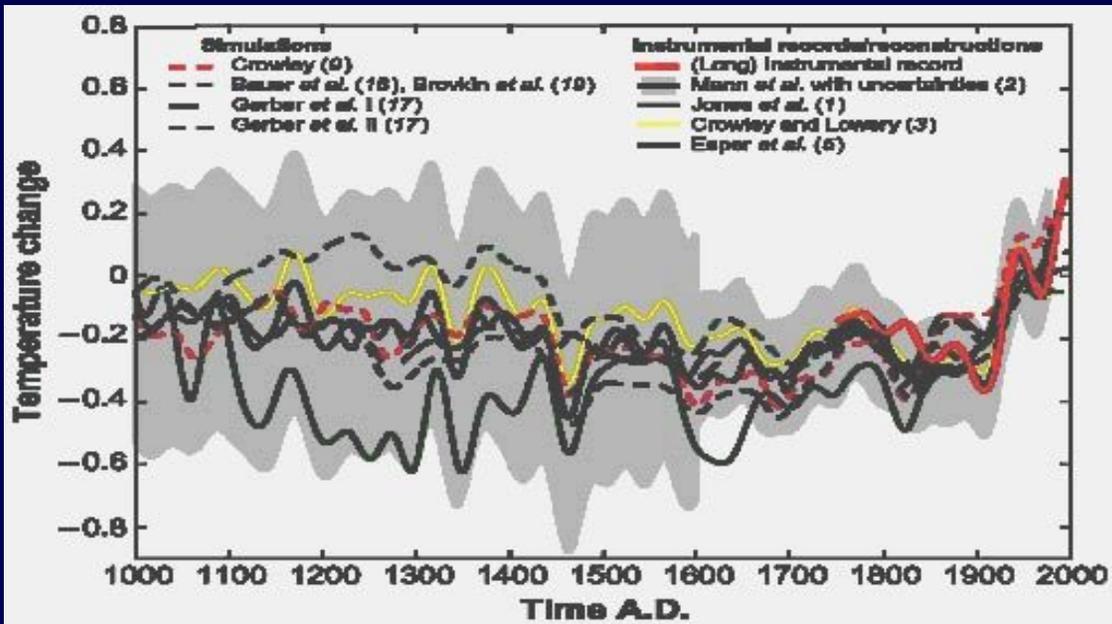
Вклад в вариации земного климата СА для разных врем. шкал: среднее по 6 реконструкциям



Вклад в вариации земного климата солнечной активности для разных временных шкал

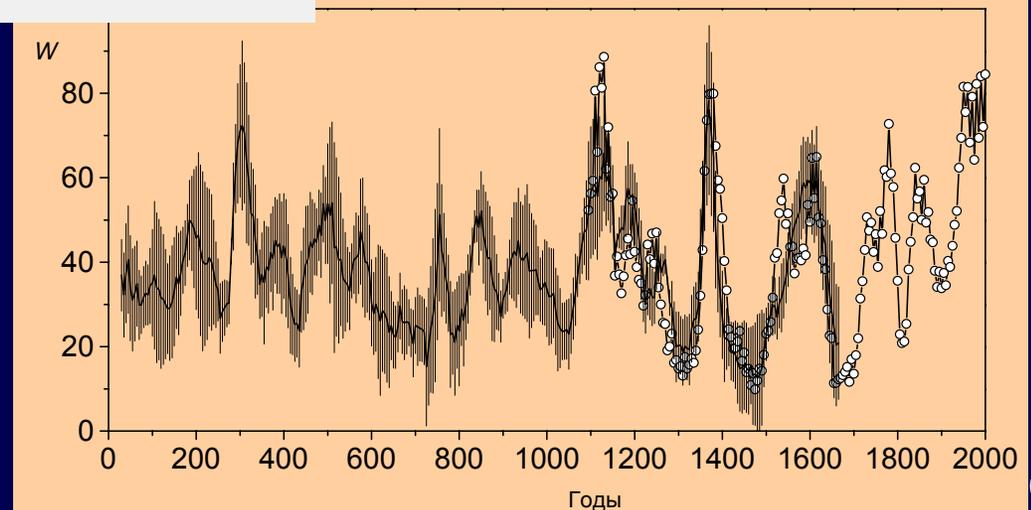


Надежность современных реконструкций СА и климата



← Средняя температура Земли

Солнечная активность →



Выводы к разд.5:

- В последние 5-10 лет достигнут определенный прогресс в реконструкции поведения солнечной активности в прошлом.
- Необходимы дальнейшие усилия по составлению надежной климатической реконструкции.
- Только надежные данные могут ответить на вопросы о связи солнечной активности и климата Земли.
- Несмотря на безусловную роль техногенных факторов, пренебрегать вкладом природных источников в изменения климата – рискованно.

**6. Дополнение:
Горная станция –
основная
наблюдательная
база ГАО РАН**

Наблюдательные базы ГАО

Утрачены:

- Николаевская астрономическая обсерватория (Украина)
- Обсерватория в Ордубаде (Азербайджан)
- Араратская экспедиция (Армения)
- База в г.Ош (Киргизия)
- Обсерватория Эль-Робле (Чили)
- Памирская экспедиция (Шор-Булак, Таджикистан)
- Институт Геофизики и астрономии (Куба)
- Обсерватория в Китабе (Узбекистан)
- Обсерватория Тариха (Боливия)

Имеющаяся база:

- Горная астрономическая станция ГАО РАН (Кисловодск и КЧР)

Горная астрономическая станция ГАО РАН



Основана в 1948 г. на плато Шад-Жадмас, КЧР, высота 2100 м,
в 27 км от Кисловодска
Место выбрано Н.И.Вавиловым (1920-е годы) и М.С.Гневышевым

Горная астрономическая станция ГАО РАН вблизи Кисловодска

- Прекрасный астроклимат. Создан непрерывный (с 1948 г.) ряд наблюдений Солнца (5,5 циклов).
- Уникальность станции: фотосфера 340 дней в году, корона – 145 дней (мировой рекорд!).
- Наблюдательная база не только ГАО РАН, но и ИЗМИРАН, ИСЗФ, НИРФИ, ИФА РАН, СПбГУ.
- В 2012 г. будет введён в строй 2,5 м звездный телескоп ГАИШ МГУ.

Инструменты для солнечных наблюдений

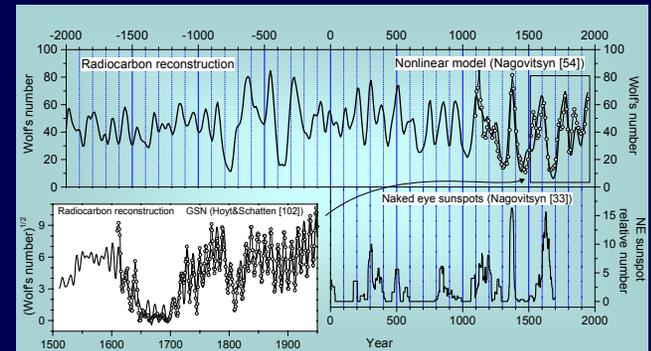
- Коронограф Лио: в линиях 5303А, 6374А и протуберанцы в H-alpha
- Большой коронограф Никольского (D=53 см) : структура хромосферы и короны, магнитные поля в протуберанцах
- Телескоп OPTON : хромосфера и протуберанцы в H-alpha
- Радиотелескопы $\lambda = 2, 3$ и 5 см
- Фотогелиограф: пятна и полярные факелы
- Спектрогелиограф: флоккулы в линии К кальция

Инструменты ГАС ГАО РАН



6. Вопросы: что мы знаем и чего не знаем...

Вопрос 1:

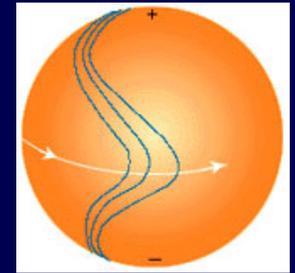


Глобальное МП Солнца испытывает квазипериодические (циклические) изменения на типичных временах 11, 22, 80-90, 210, >900 лет.

Какова математическая модель этих вариаций?



Вопрос 2:



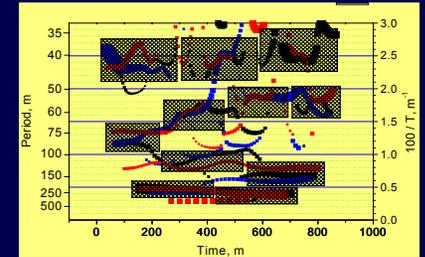
На Солнце работает ω -эффект (усиление глобально-тороидального МП дифференциальным вращением).

Какой обратный процесс приводит к усилению полоидального (крупномасштабного) МП?

Действительно ли классическая схема α - ω динамо работает на Солнце?



Вопрос 3:

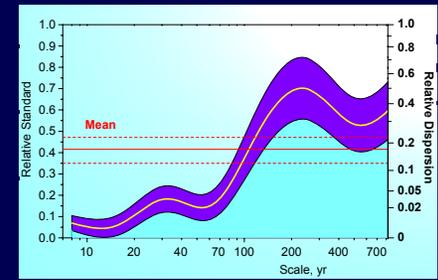


Кроме известных 3- и 5- минутных колебаний, в АО Солнца присутствуют длительные колебания МП с типичными временами десятки-тысячи минут в ряде частотных полос.

Какова геометрическая структура этих колебаний? Какова их физическая природа?



Вопрос 4:



Климат последних 150 лет испытывает серьезные изменения. Разработан ряд моделей (IPCC), учитывающих вклад антропогенных факторов.

Какова относительная роль антропогенных и естественных факторов, в том числе СА, в этих изменениях? Каков сценарий изменения климата в будущем?



Спасибо за внимание!