

11-ЛЕТНИЙ СОЛНЕЧНЫЙ ЦИКЛ: НАБЛЮДЕНИЯ, ТЕОРИЯ, ПРОГНОЗ

Л. Л. Кичатинов (kit@iszf.irk.ru)

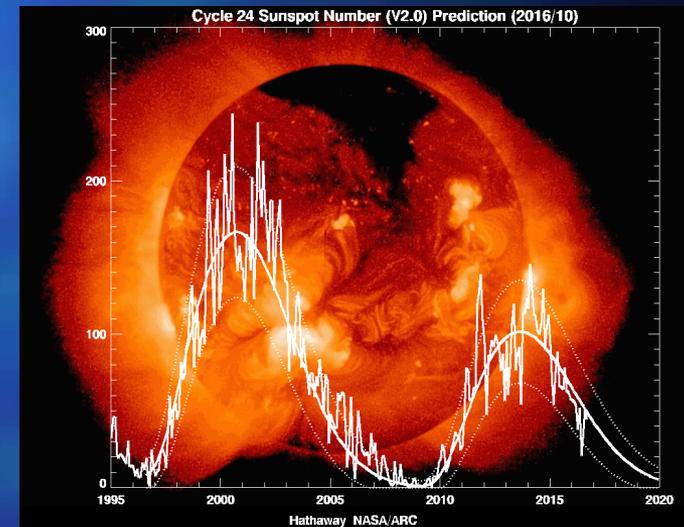
Как был открыт солнечный цикл и
солнечно-земные связи

Сценарий солнечного цикла

Прогноз солнечной активности на основе
представлений о динамо

Солнечно-звездные аналогии

Вероятность солнечных супервспышек

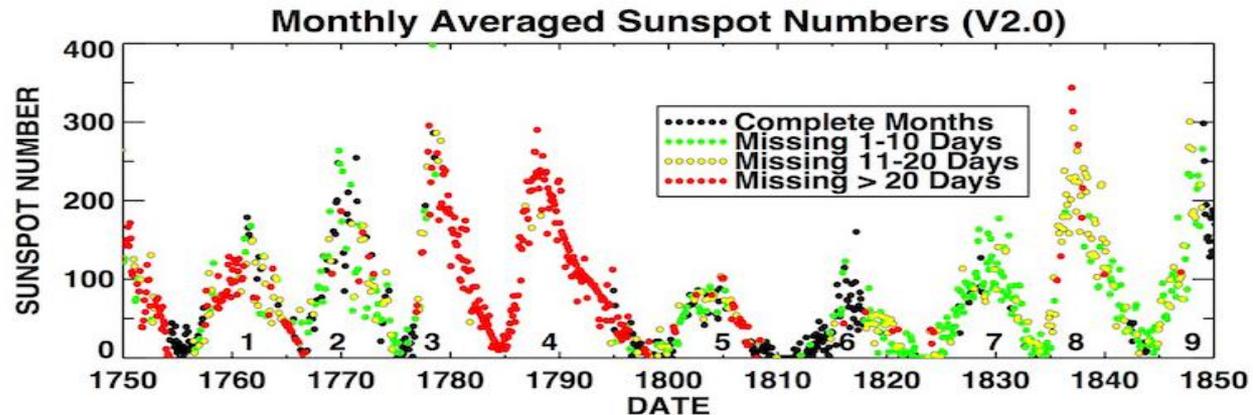


БШФФ - 2017



Samuel Heinrich Schwabe
1789-1875

Астроном-любитель, Генрих Швабе, систематически наблюдал Солнце с 1826 года и в 1844 году объявил об 11-летнем цикле солнечных пятен.



Edward Sabine
1788-1883

Вскоре после открытия Швабе, Эдвард Сэбайн объявил о наличии цикла, подобного солнечному, в возмущениях магнитного поля Земли (1852 год).

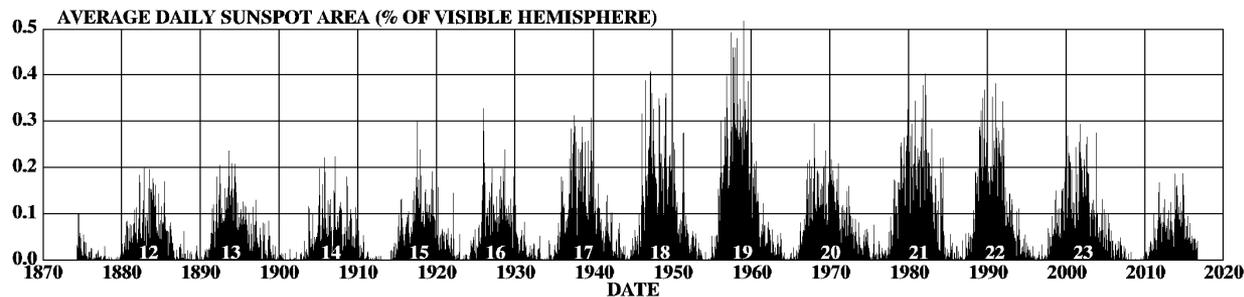
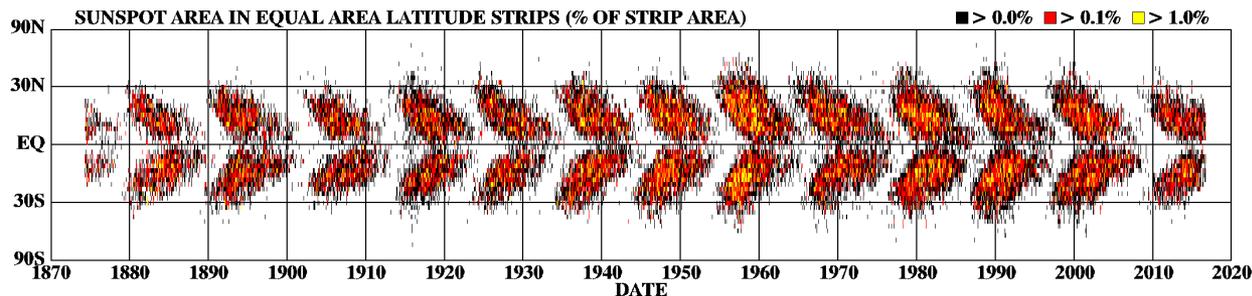
Вспышка Кэррингтона (1.09.1859; энергия $\sim 10^{32}$ эрг) вызвала некоторые нарушения телеграфной связи.

Событие 9.03.1989 ($\leq 10^{32}$ эрг) привело к отключению электроэнергии на 8 часов в густонаселенном районе Канады.

На подобных Солнцу звездах зарегистрированы вспышки с энергией до 10^{36} эрг (Shibata && 2013).

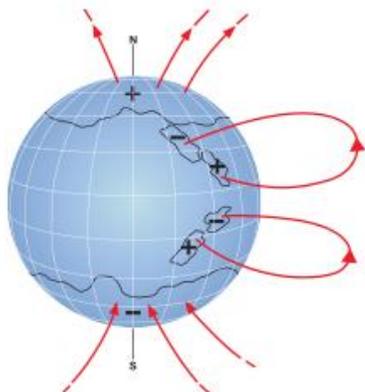
11-летний цикл солнечных пятен

DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS

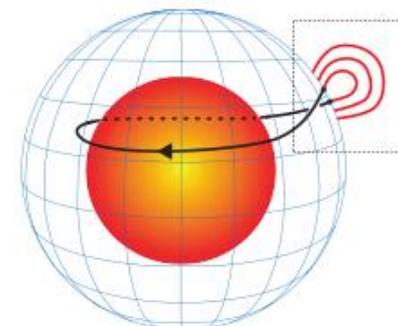


<http://solarscience.msfc.nasa.gov/>

HATHAWAY NASA/ARC 2016/10

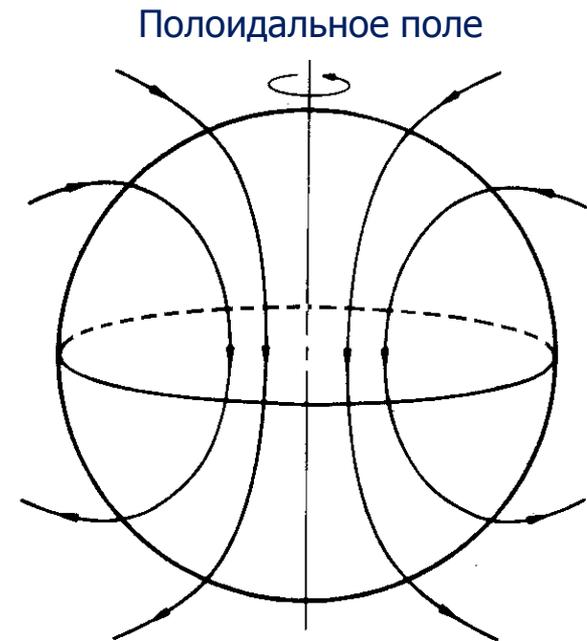
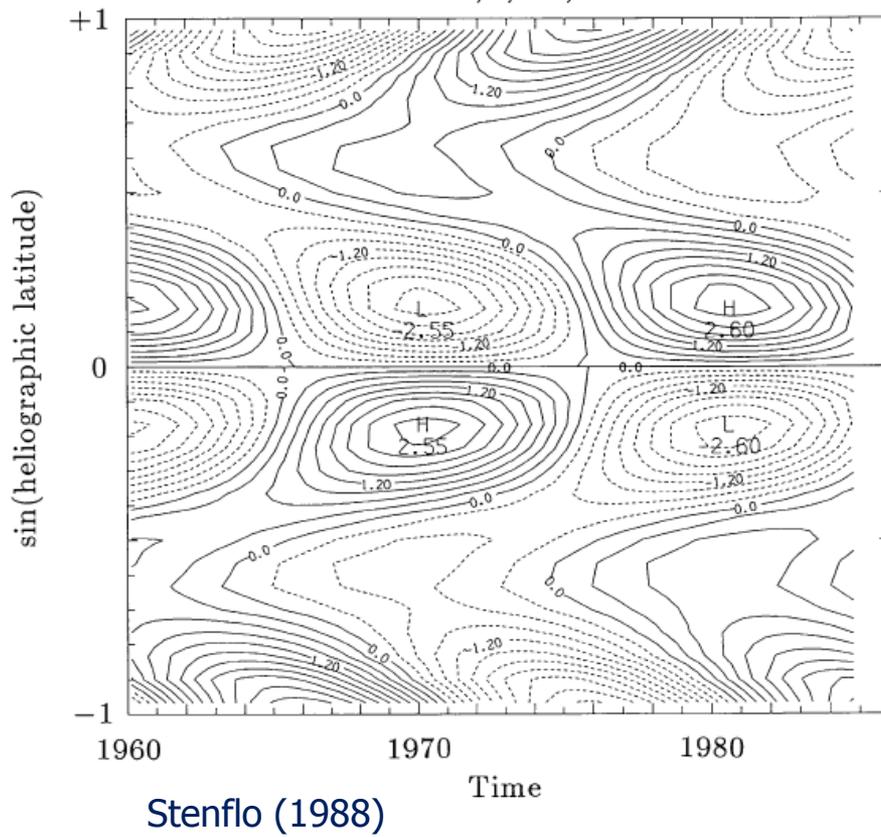


Ведущие (во вращательном движении) пятна имеют противоположную полярность в северном и южном полушариях, а также противоположную полярность по отношению к ведомым пятнам. По всей вероятности, пятна являются проявлением глубинного *тороидального* поля Солнца.



11-летний цикл радиального (полоидального) поля солнечной поверхности

Superposition of the 7 odd modes
 $\ell = 1, 3, \dots, 13$



Полоидальное и тороидальное поля Солнца
согласованно изменяются во времени

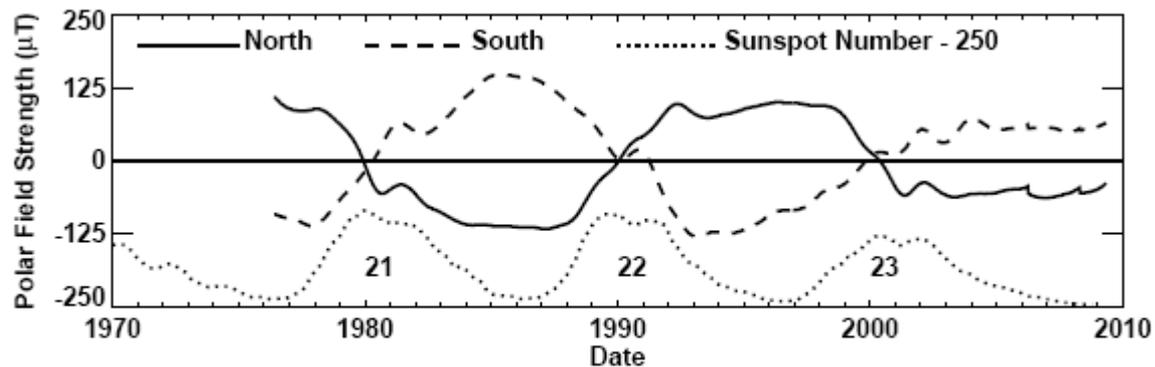


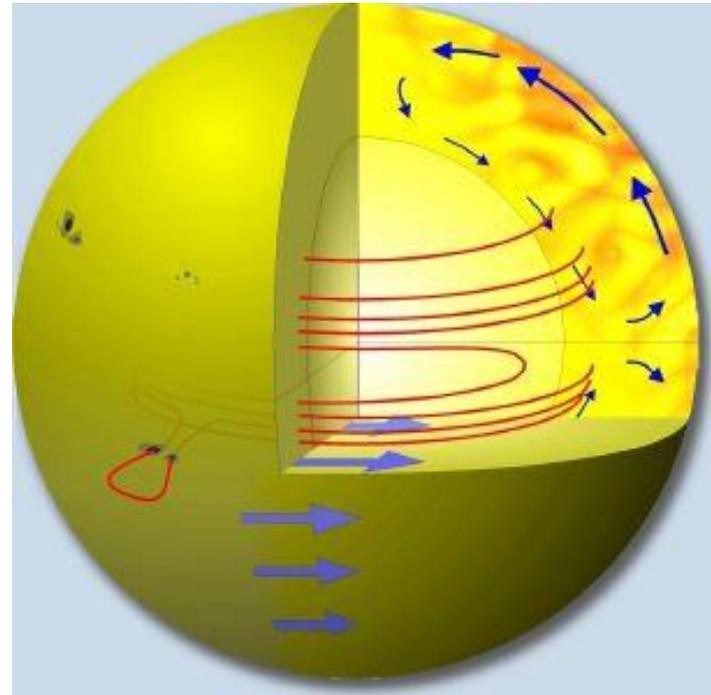
Figure 1. The polar field of the Sun as a function of time (on the basis of the Wilcox Solar Observatory data) with the sunspot number shown below. From Hathaway (2010).

Гидромагнитное динамо =

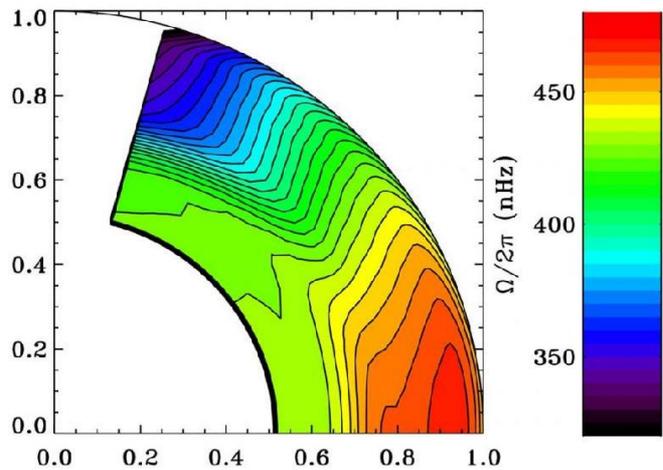
= генерация магнитного поля течениями проводящих жидкостей =
= неустойчивость течений проводящих жидкостей к магнитным
возмущениям

Уравнение индукции магнитного поля: $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B} - \eta \text{rot} \mathbf{B})$

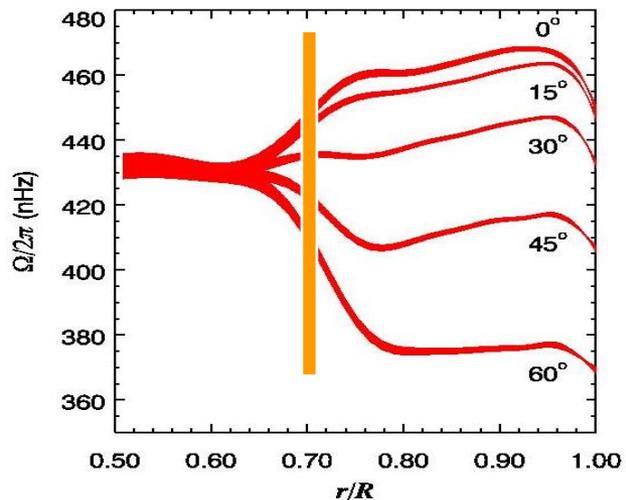
На Солнце, достаточно сложные для действия динамо течения имеются в конвективной зоне (во внешнем сферическом слое толщиной около 200000 км, или около 30% от солнечного радиуса).



Дифференциальное вращение

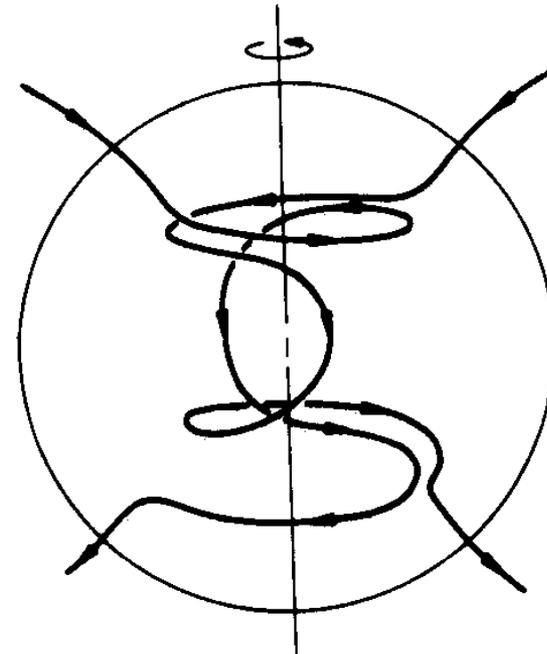


Gilman & Howe (2003)



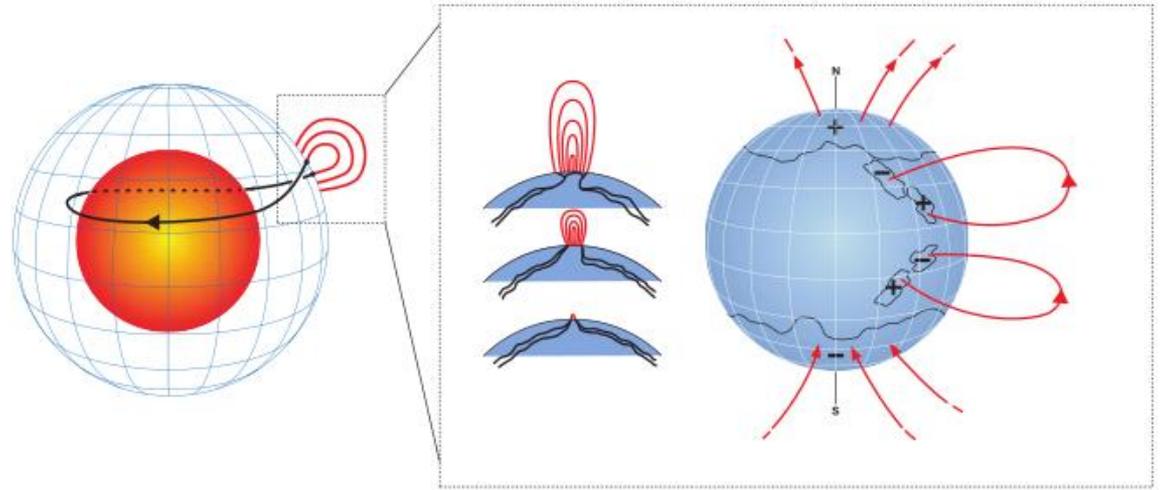
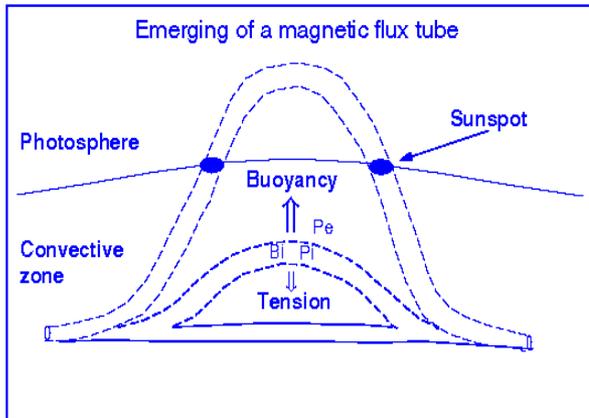
NSF's Solar Observatory

Ω - эффект

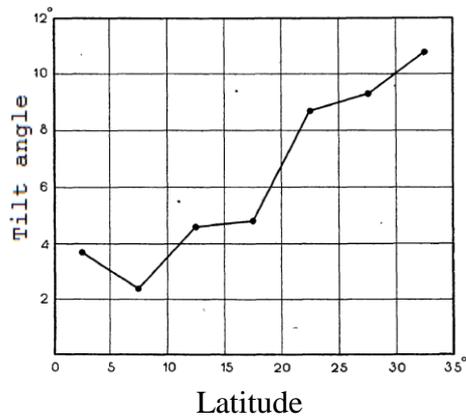


Дифференциальное вращение генерирует тороидальное поле из полоидального

α — эффект преобразования тороидального поля в полоидальное (механизм Бэбкока-Лейтона)



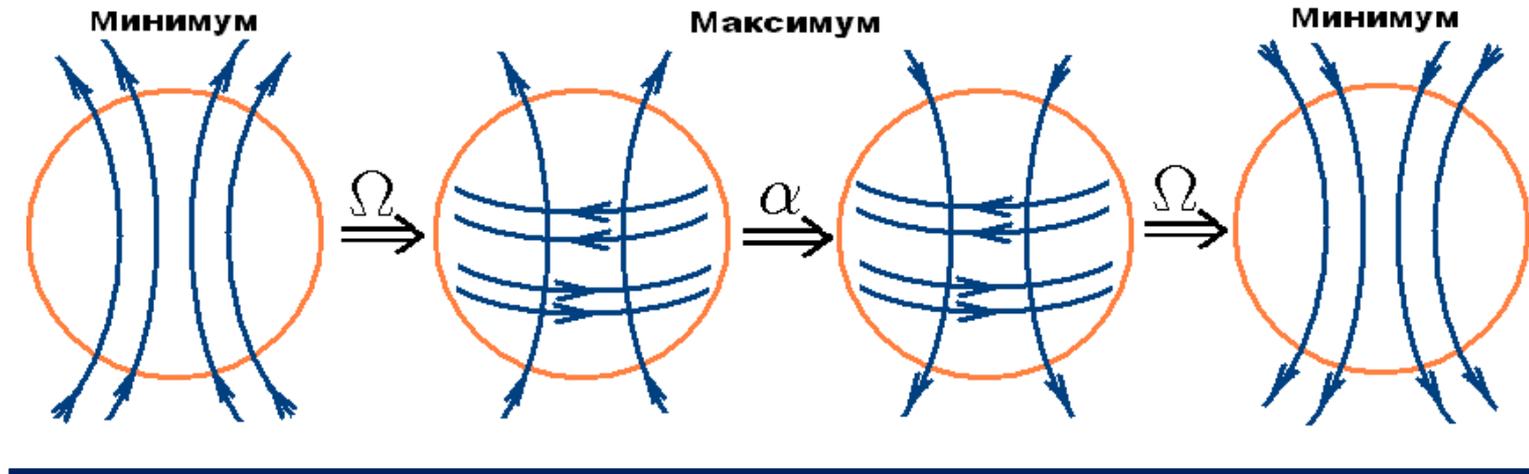
Правило Джоя
(Joy's law; Hale et al. 1919)



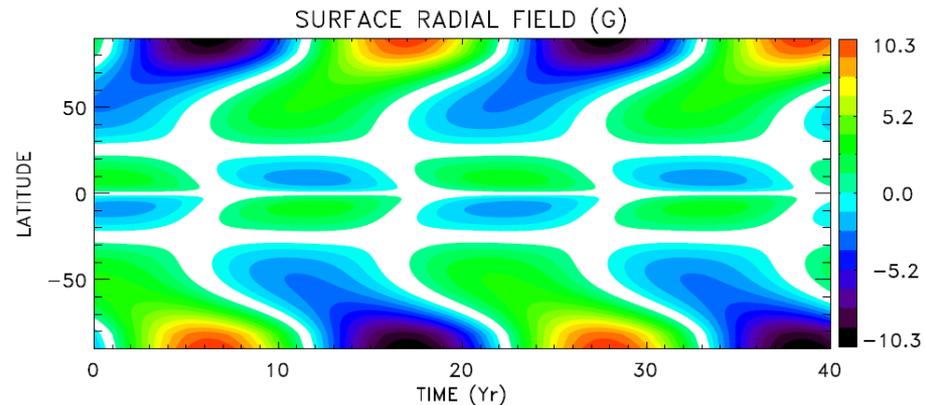
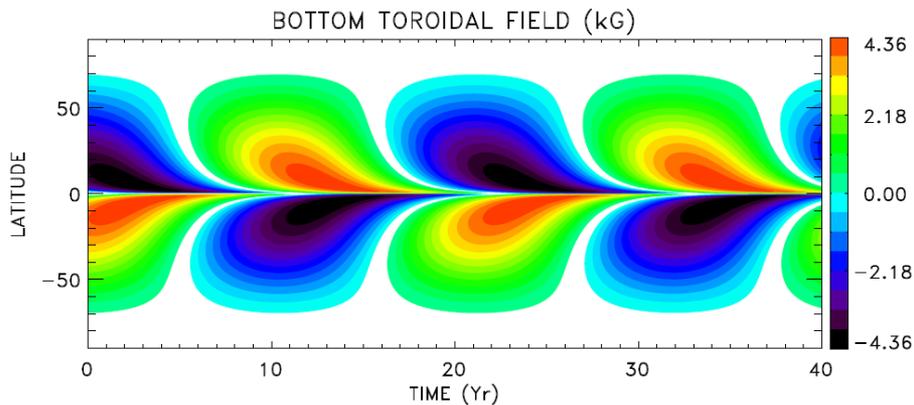
Тороидальное поле в глубине конвективной зоны неустойчиво к разбиению на трубки (Parker 1984).

Правило Джоя объясняется действием силы Кориолиса на всплывающие из глубины конвективной зоны магнитные трубки (D'Silva & Choudhuri 1993).

Сценарий солнечного цикла ($\alpha\Omega$ -динамо)

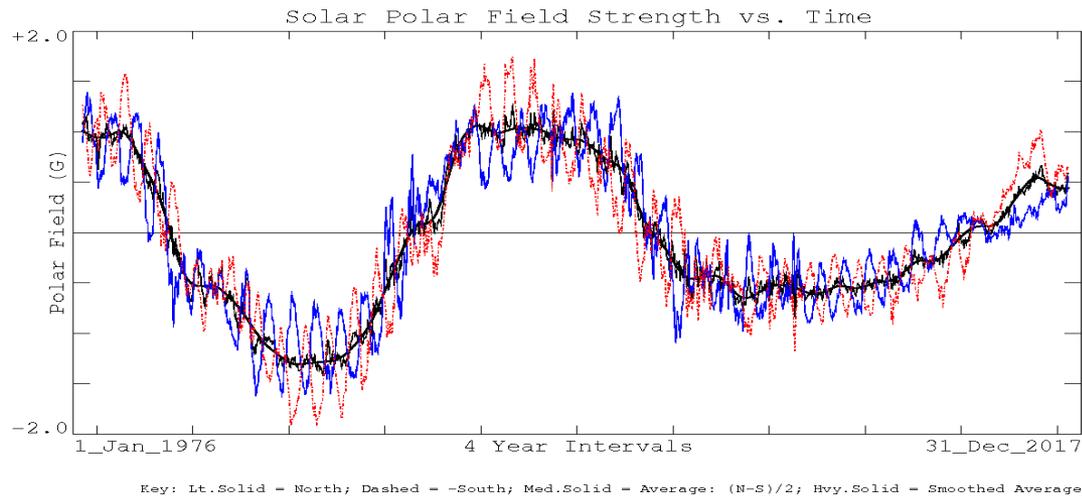
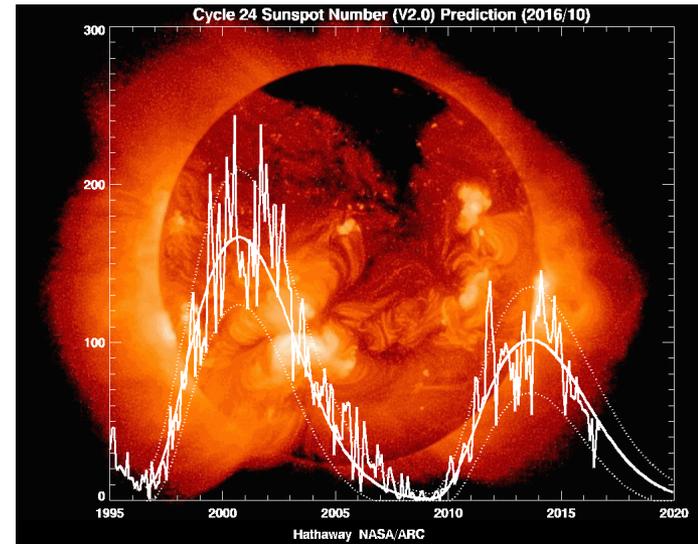
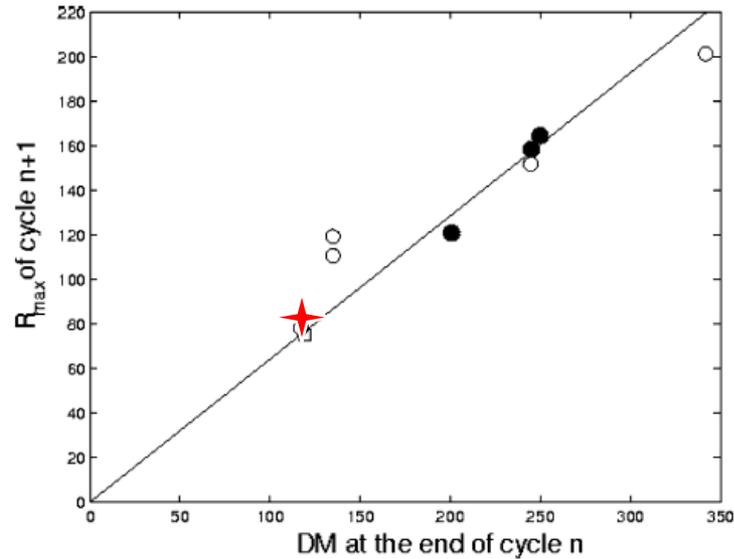


Численная модель солнечного динамо

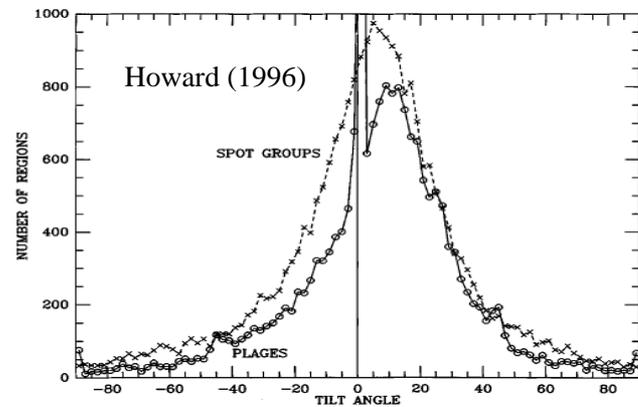
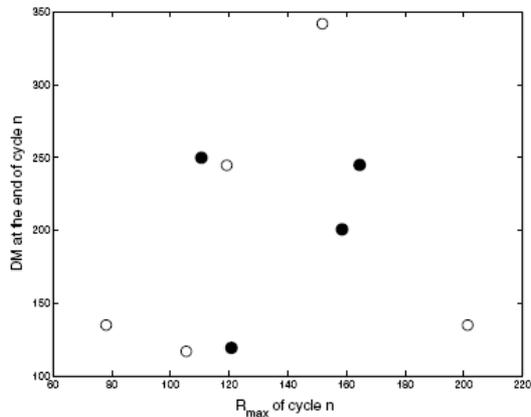
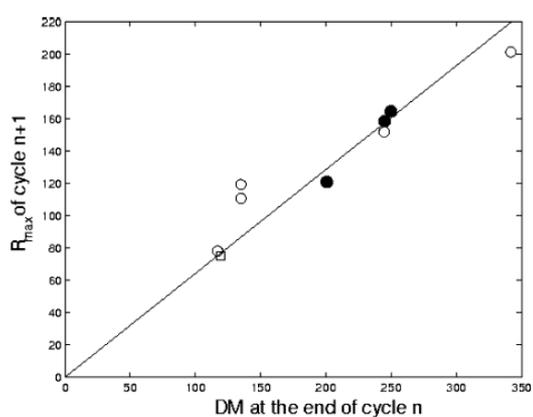


Наблюдаемые последствия действия Ω -эффекта

Jiang, Chatterjee & Choudhuri (2007)

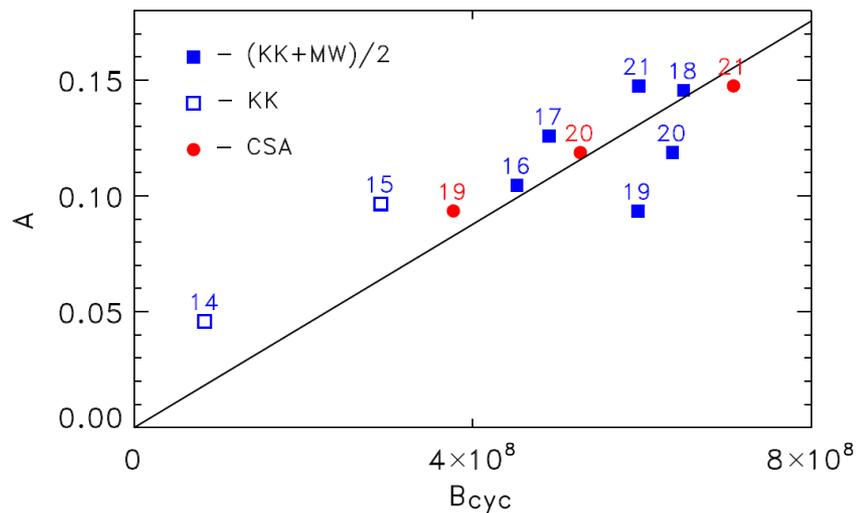
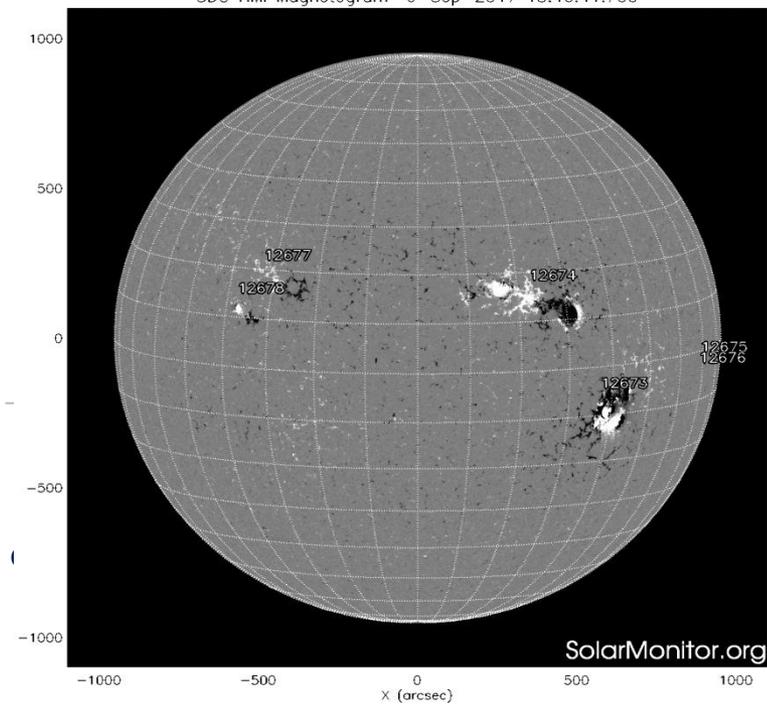


Оценка α -эффекта по данным о солнечных пятнах



Jiang, Chatterjee & Choudhuri (2007)

SDO HMI Magnetogram 6-Sep-2017 18:46:41.700



Olemsky, Choudhuri & Kitchatinov (2013)

Динамо с учетом флуктуаций

$$\alpha \Rightarrow (1 + s\sigma_{B_{\text{Car}}})\alpha$$

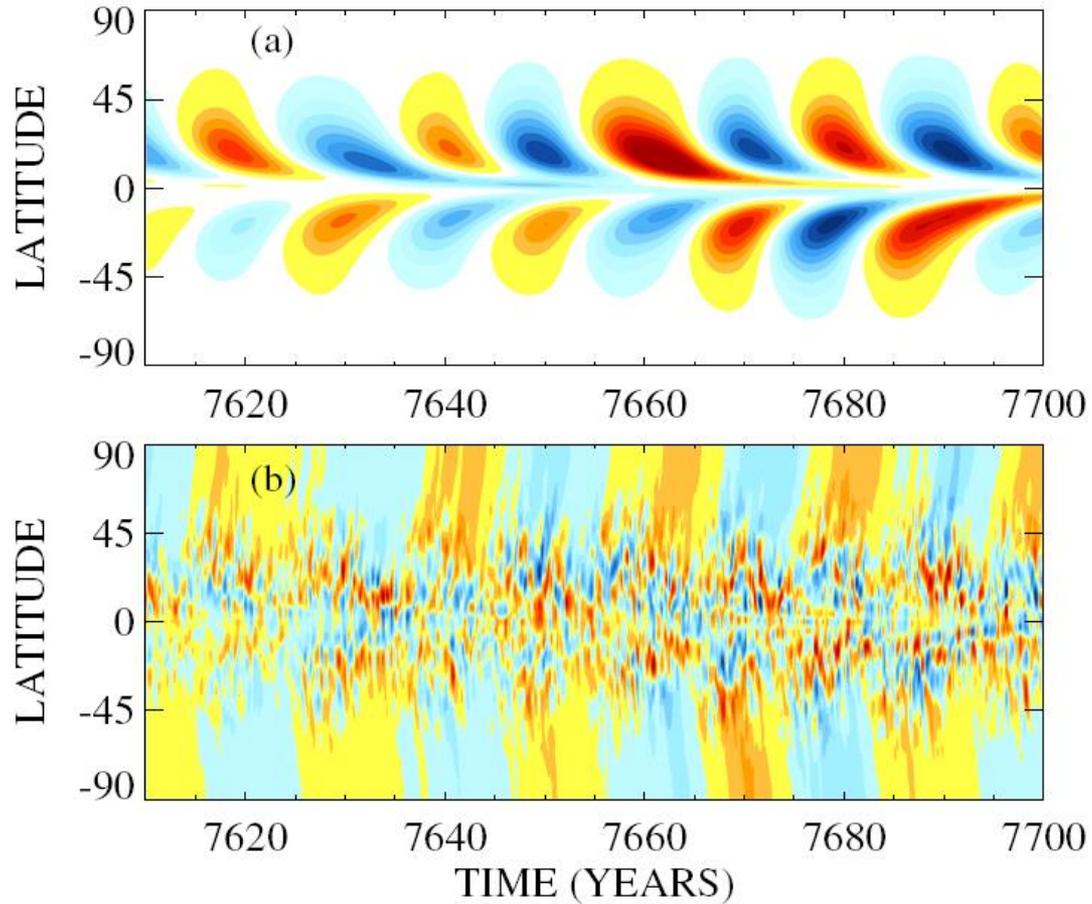


Figure 5. Time–latitude diagrams of (a) the near-bottom toroidal magnetic field and (b) the surface radial field.

Глобальные минимумы/максимумы по радиоуглеродным данным

Usoskin et al. (2007, 2014)

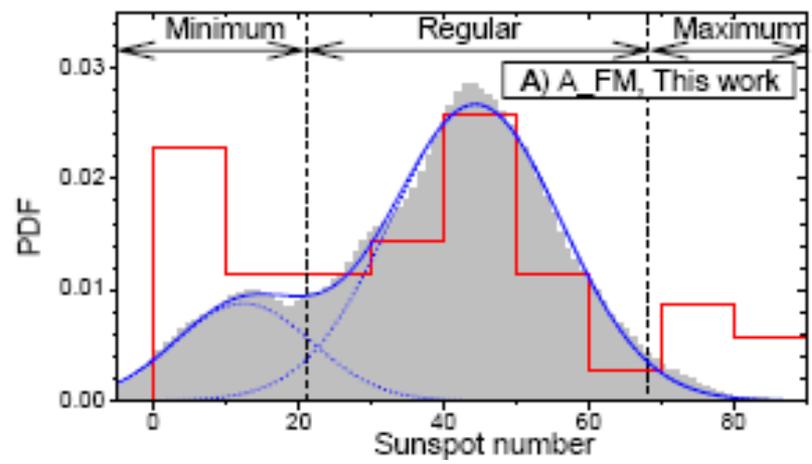
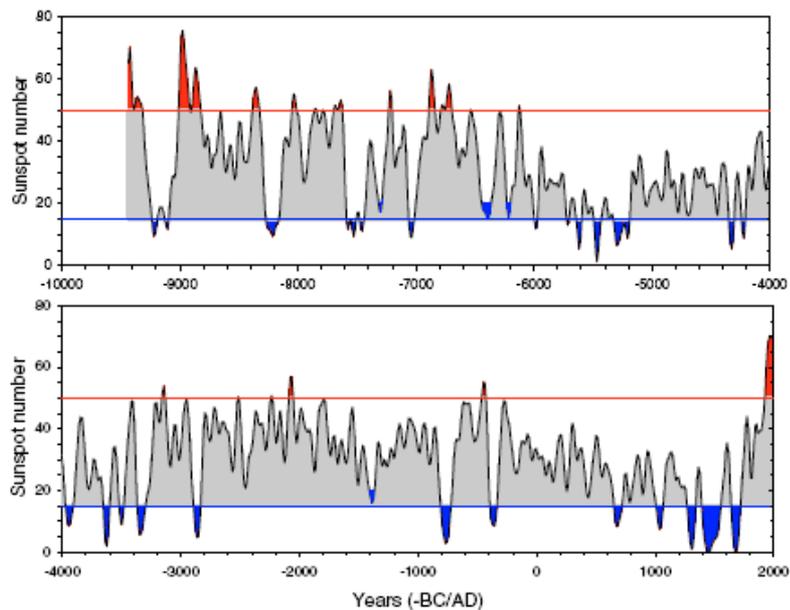


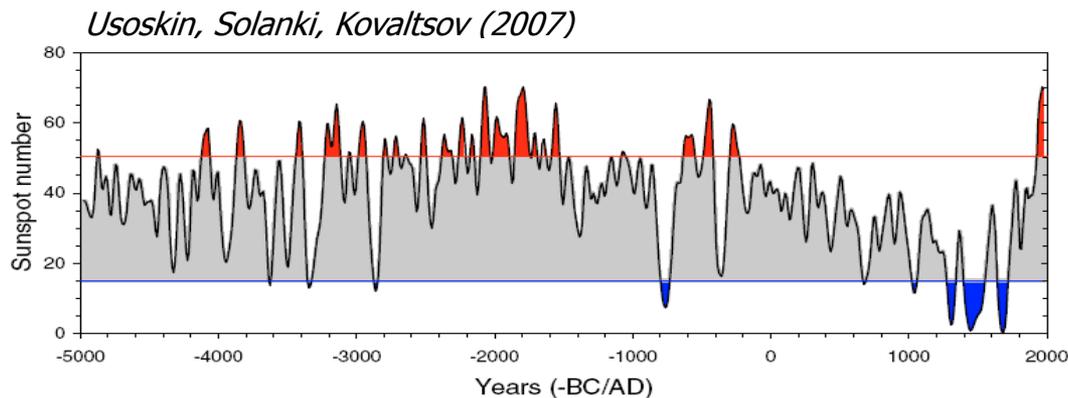
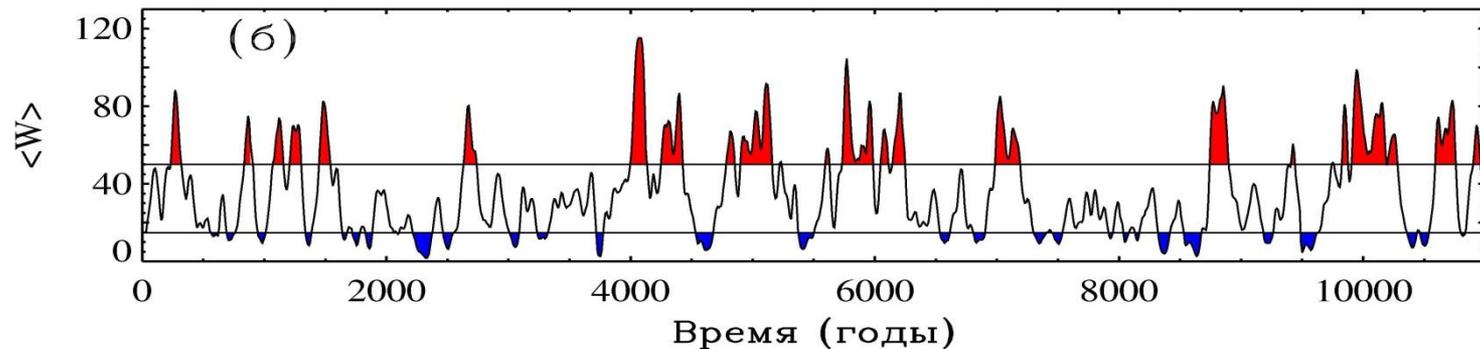
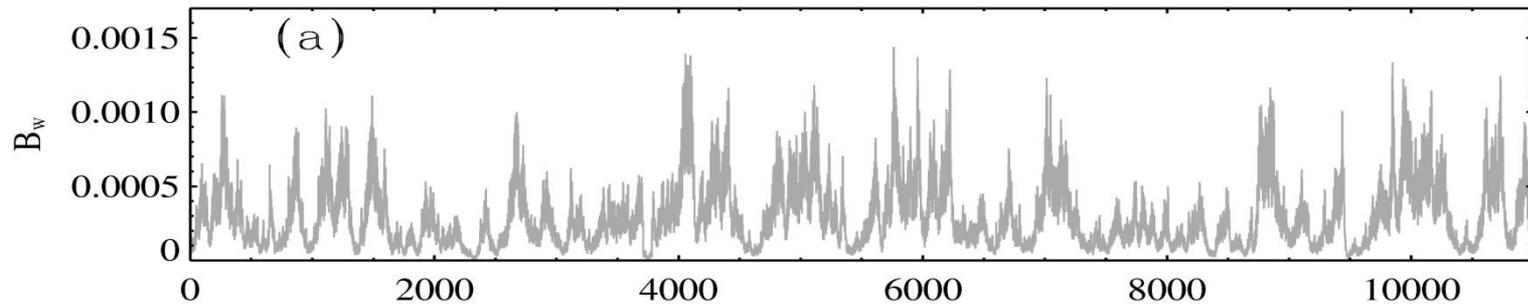
Fig.3. Sunspot activity SN-L throughout the Holocene (see text)

Расчеты за длительное время (~11000 лет)

$$B_w = \int_{x_i}^1 \int_0^\pi x \phi_b(x) \sin \theta |B(x, \theta)| dx d\theta$$

$$W = C_w B_w \exp\left(-\frac{B_0}{B_w}\right)$$

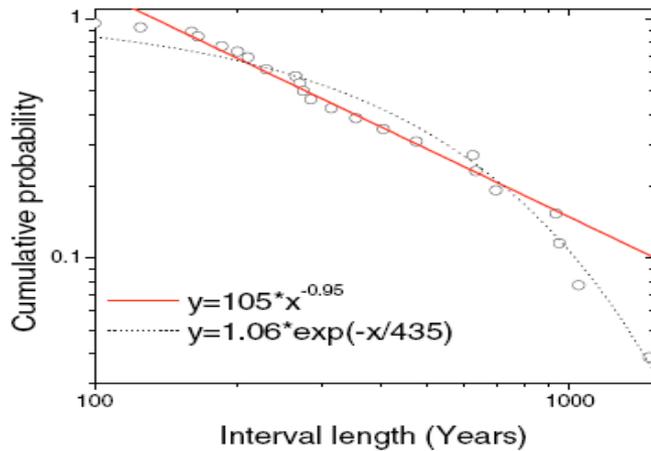
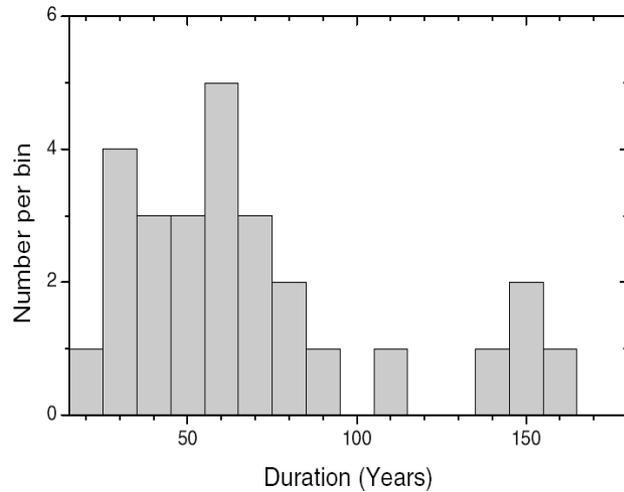
Фильтр (1-2-2-2-1)



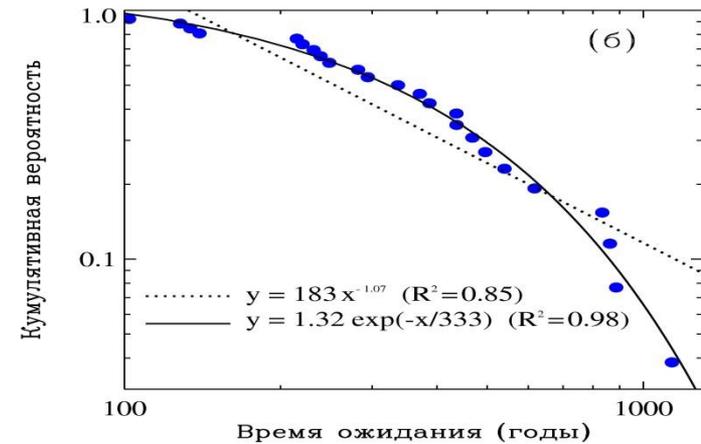
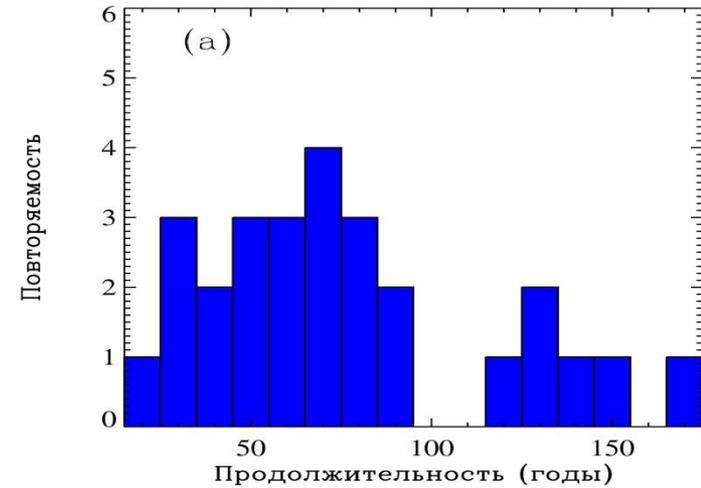
Восстановлено по
содержанию ^{14}C в
природных архивах

Распределения продолжительностей и времен ожидания глобальных минимумов

Данные (Usoskin et al. 2007)



Модель



Почему Солнце может находиться вблизи “порога выключения” динамо?

Динамо-число является растущей функцией угловой скорости. Вращение звезд замедляется со временем, $\Omega \sim t^{-1/2}$, из-за потери углового момента на звездный ветер (Skumanich 1972).

Глобальные минимумы активности наблюдаются только на старых звездах (Saar, Baliunas 1992; Wright 2004).

Динамо-число

$$D = \frac{\alpha_0 \Delta \Omega R^3}{\eta_T^2}$$

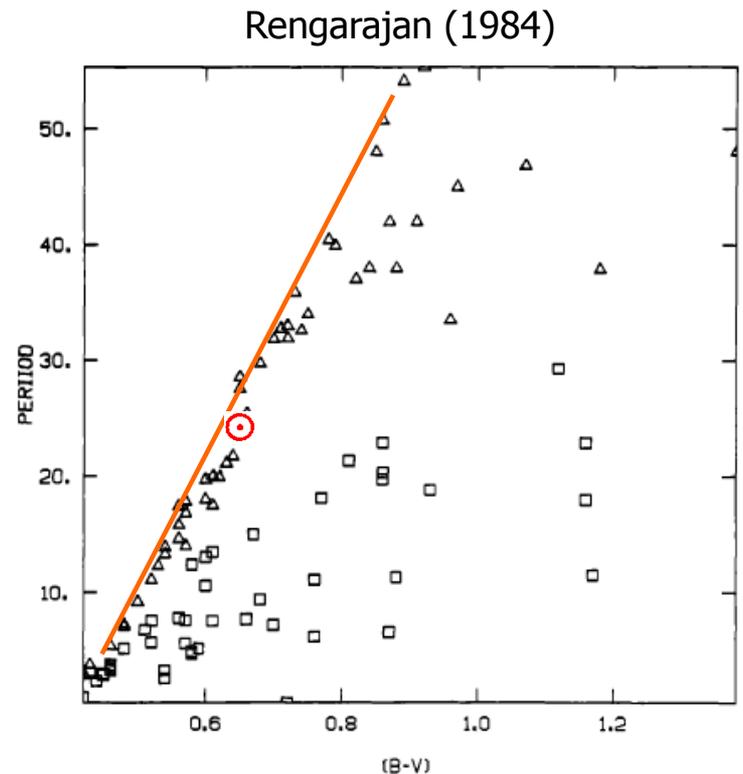
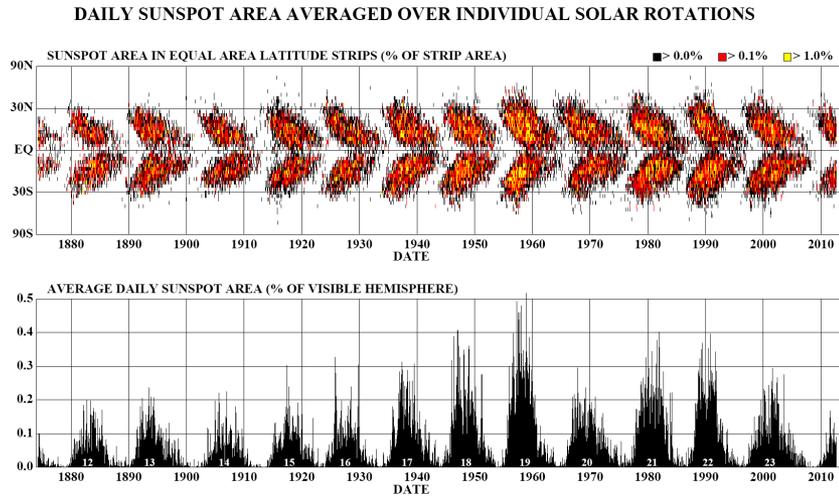


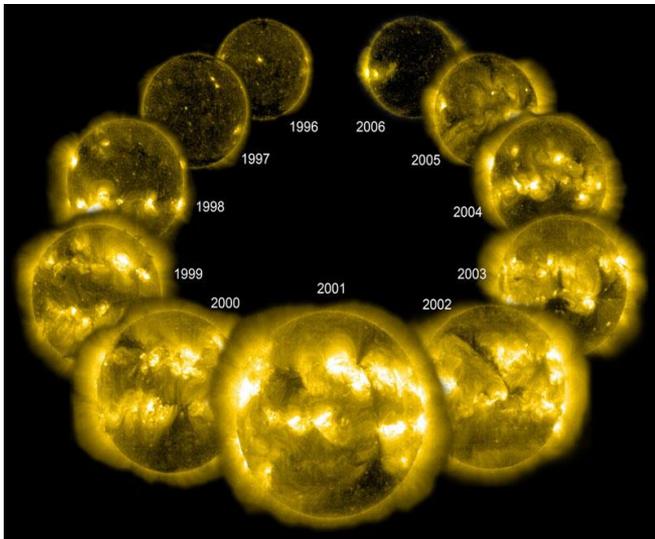
FIG. 1.—Plot of $B - V$ vs. period in days for main-sequence stars

Циклы активности

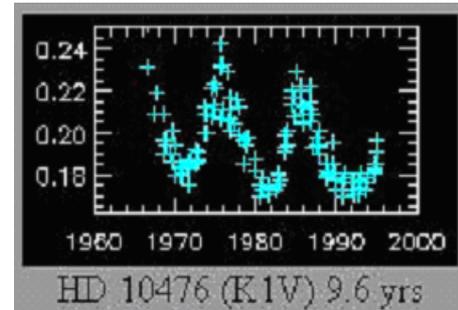
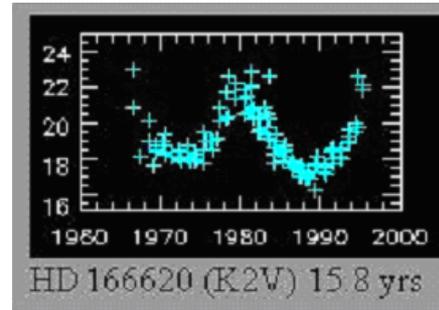
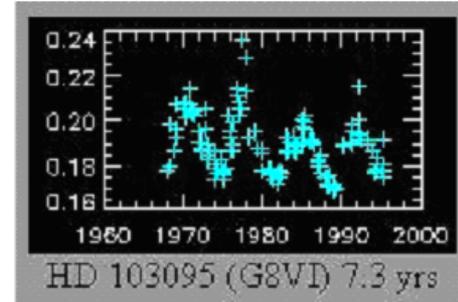
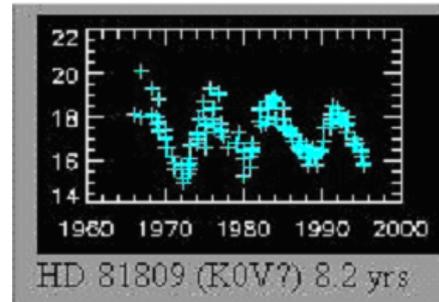
на Солнце



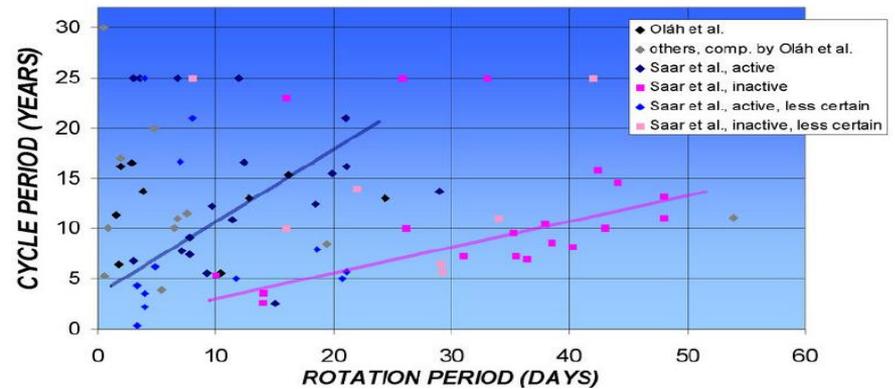
23-й солнечный цикл по данным SOHO (ультрафиолет)



и звездах



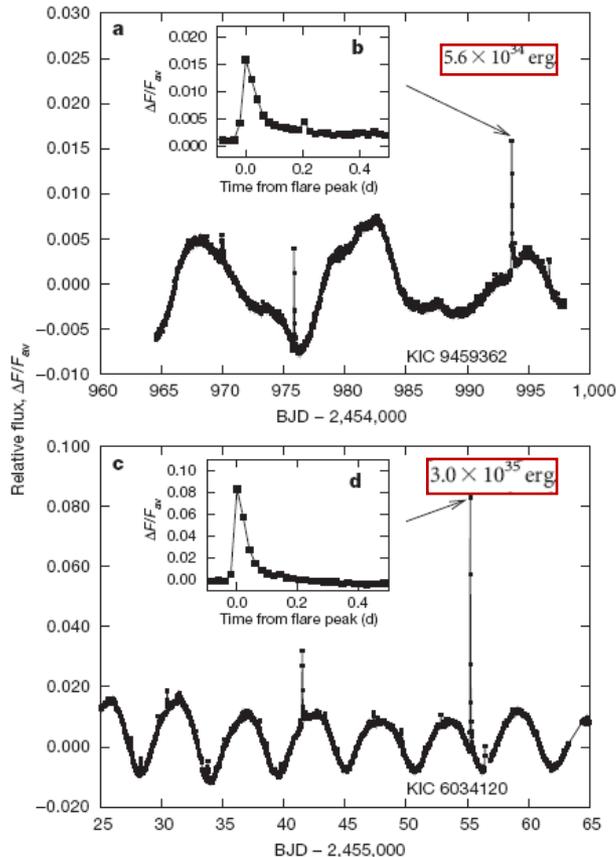
Ca II H&K (Baliunas et al. 1998)



Saar & Brandenburg (1999)

Супервспышки ($E > 10^{33}$ эрг) на подобных Солнцу звездах по данным космического телескопа «Кеплер»

Примеры супервспышек
(Maehara et al. 2012)

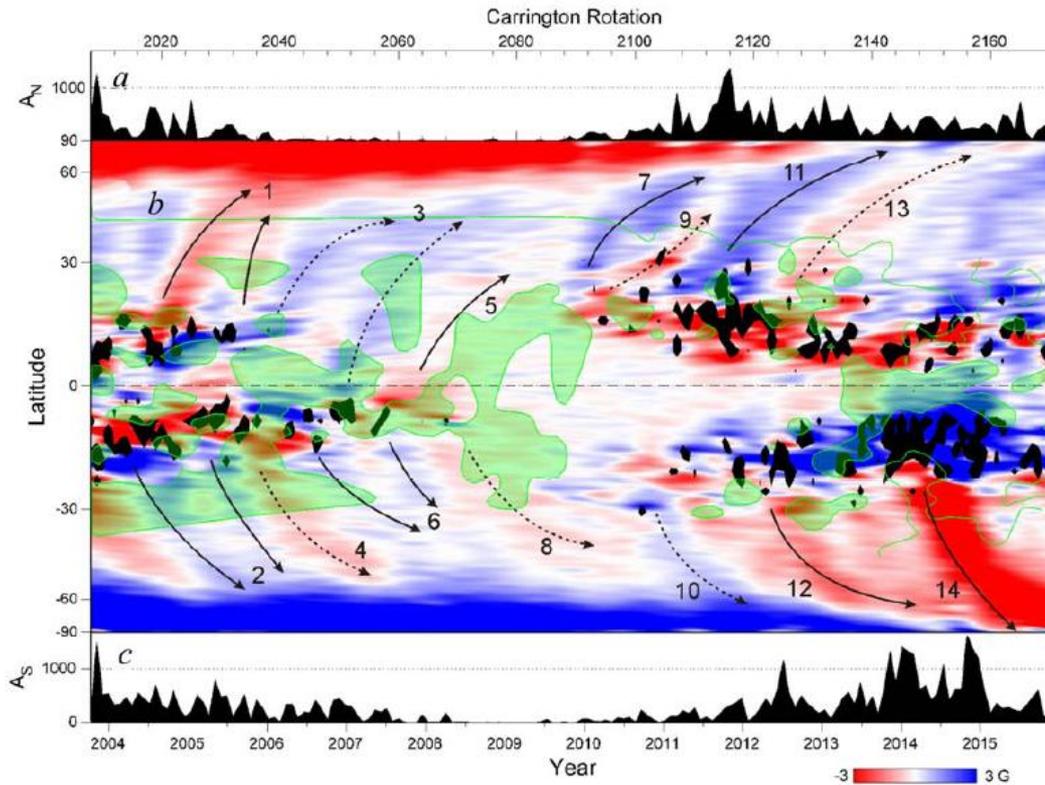


Более 100000 наблюдавшихся звезд показали около 1500 супервспышек. Многие из звезд с супервспышками, подобно Солнцу, относились к спектральному классу G и вращались с периодом более 10 суток (Shibayama et al. 2013). Супервспышки отмечены на двух «двойниках» Солнца (Nogami et al. 2014).

Оценка частоты солнечных супервспышек (Shibata et al. 2013): одно событие с энергией $\geq 10^{34}$ эрг в 800 лет, и одно событие с энергией $\geq 10^{35}$ эрг в 5000 лет.

Супервспышки показали лишь около 0.3% наблюдавшихся звезд, но в этой малой группе пришлось в среднем около 5 вспышек на звезду.

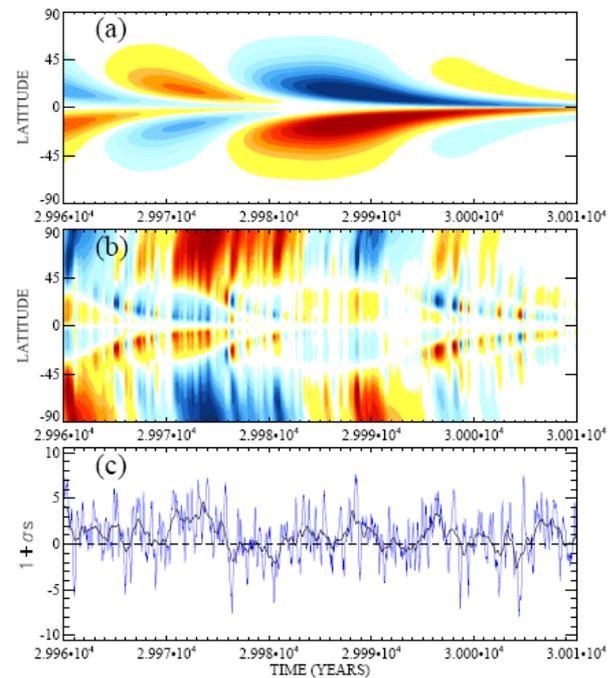
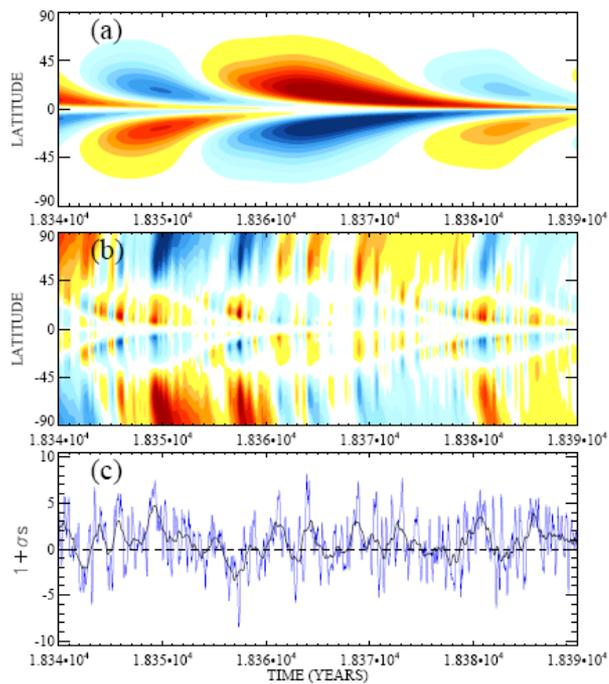
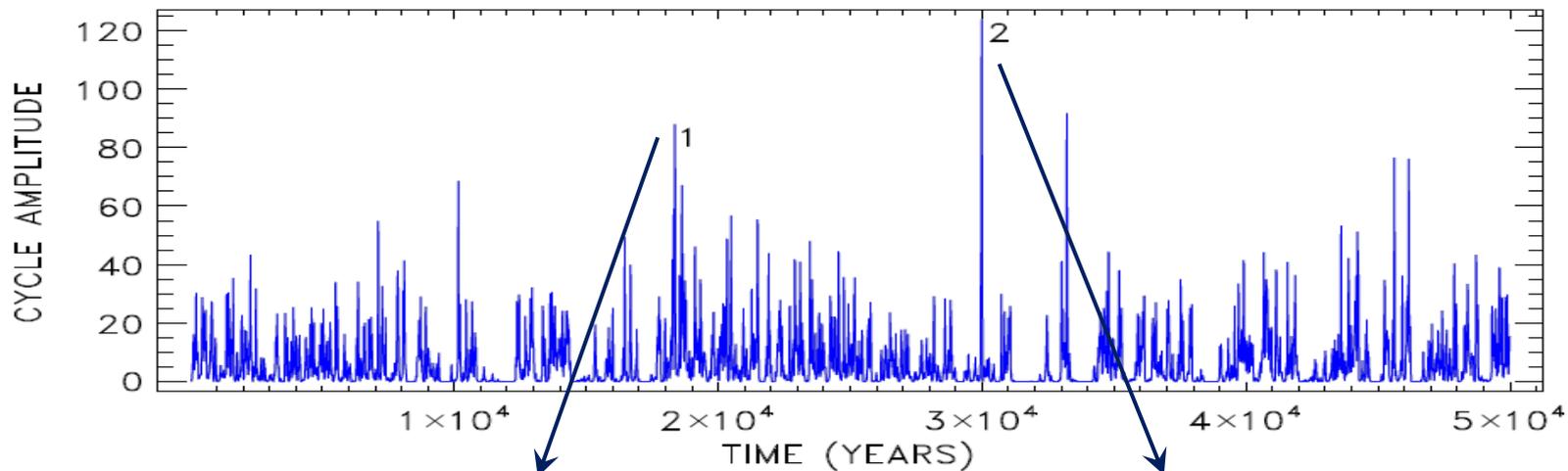
Нарушения правила Джоя неоднократно отмечались, в том числе и в текущем цикле активности.



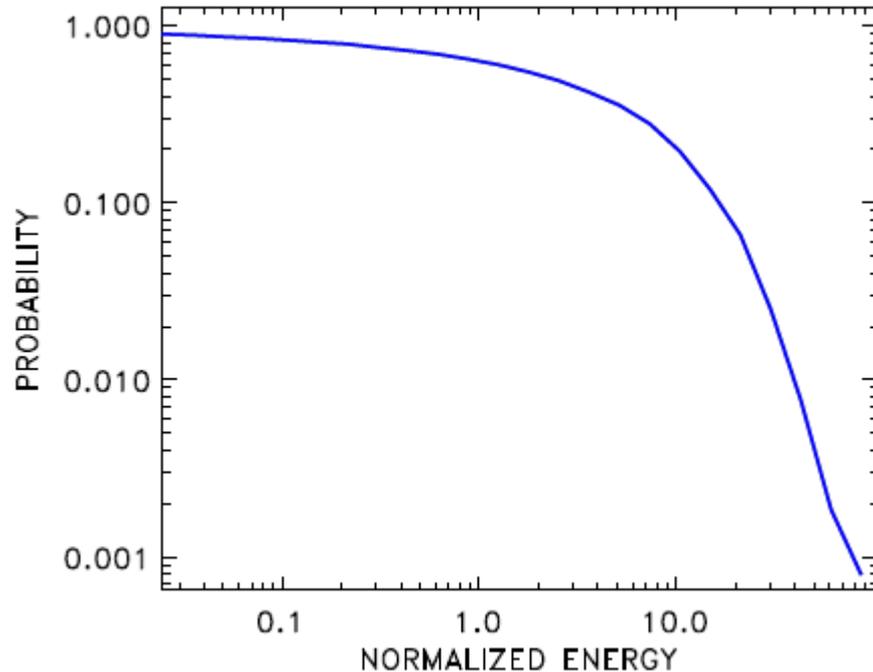
Мордвинов и др. (2016)

Figure 4. Changes in sunspot areas for the northern (a) and southern (c) hemispheres. Time-latitude evolution of zonal magnetic flux is shown in red-to-blue (b); zones of intense sunspot activity and domains of non-Joy's active region tilt are overlotted in black and green colors

С учетом флуктуаций ($\sigma = 2.7$)



Распределение расчетных циклов по магнитной энергии



Относительное число (доля) циклов, амплитуда магнитной энергии в которых превышает определенное значение (относительно средней амплитуды).

$$P(E_m \geq 10E_0) = 0.204$$

$$P(E_m \geq 30E_0) = 0.025$$

Только один цикл (из около 4000) имел амплитуду $E_m > 100E_0$

Данные о солнечной активности в прошлом, полученные по содержаниям космогенных радионуклидов в природных архивах, не дают свидетельств вспышек с энергией выше 10^{33} эрг в последние 11 тысяч лет (И.Г.Усоскин, частное сообщение).

Наблюдения показывают примеры анти-солнечного дифференциального вращения ряда звезд. Все они относятся либо к тесным двойным системам, либо к гигантам III класса светимости (Strassmeier 2004).

Выводы

Действие двух основных эффектов $\alpha\Omega$ -динамо на Солнце подтверждается наблюдениями.

Величина полоидального магнитного поля в минимуме активности определяет амплитуду следующего 11-летнего цикла.

Модель динамо глобальных максимумов и косвенные данные о солнечной активности в прошлом указывают на ничтожно малую вероятность солнечных супервспышек.