«Физические основы прогнозирования гелиогеофизических процессов и событий»

ВРЕМЕННЫЕ СВЯЗИ В ПРОЯВЛЕНИЯХ ДИНАМИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СОЛНЦЕ И СРЕДНЕСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Наговицын Ю.А., Осипова А.А., Иванов В.Г.

Главная (Пулковская) обсерватория РАН
Государственный университет аэрокосмического приборостроения

Определение

- Будем понимать под среднесрочным прогнозированием солнечной активности количественное суждение о ее изменениях через несколько лет или десяток лет. Наиболее актуальный среднесрочный прогноз – прогноз следующего 11-летнего цикла. Чаще всего прогнозируемыми параметрами являются величина максимума цикла и год его наступления.

Два направления прогнозирования

- Прогноз на основе ранних проявлений зарождающегося нового 11-летнего цикла в различных индексах – предвестников или “прекурсоров” (фактически это – диагностика)
- Прогноз на основе внутренних закономерностей временнОго ряда избранного индекса

1. Прогнозируемые индексы

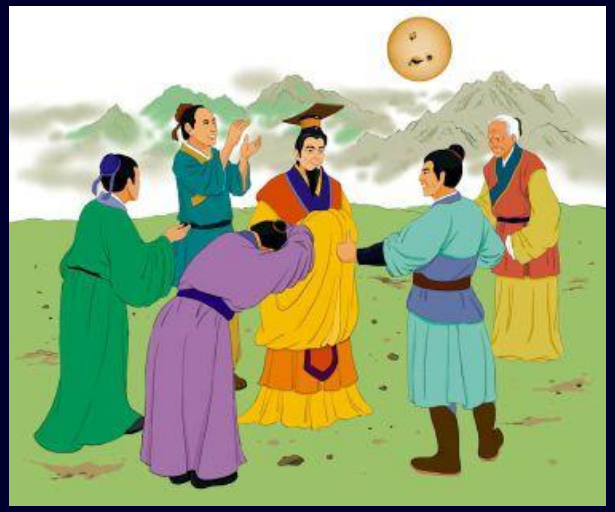
Что мы прогнозируем?

- *Определение:* Индексы СА – глобальные численные характеристики, усредненные по тому или иному интервалу времени и относящиеся ко всему Солнцу или существенной его части, которые отражают особенности того или иного вида солнечной активности (солнечных пятен, факельных площадок, солнечных вспышек, протуберанцев и т.д.). /Ю.И.Витинский, М.Копецкий, Г.В.Куклин, 1986/
- Нас будут интересовать индексы пятенной активности Солнца. Кроме них, существуют и другие индексы, характеризующие различные проявления активности в фотосфере, хромосфере, короне, в окрестностях Земли и ее магнитном поле.

Солнечные пятна – Древний Китай

Несколько сотен сообщений о наблюдении пятен невооруженным глазом с 165 г до НЭ до 17 в. НЭ (каталог Виттмана-Сю)

Мо-Цзы: камера-обскура (“темная комната”)



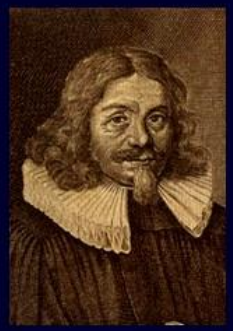
Солнечные пятна – Европа

1611 г.:

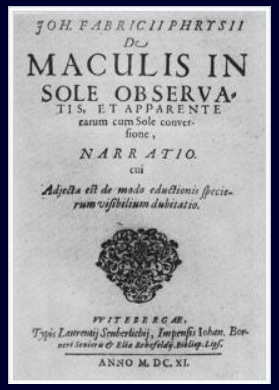
Галилей

Шейнер

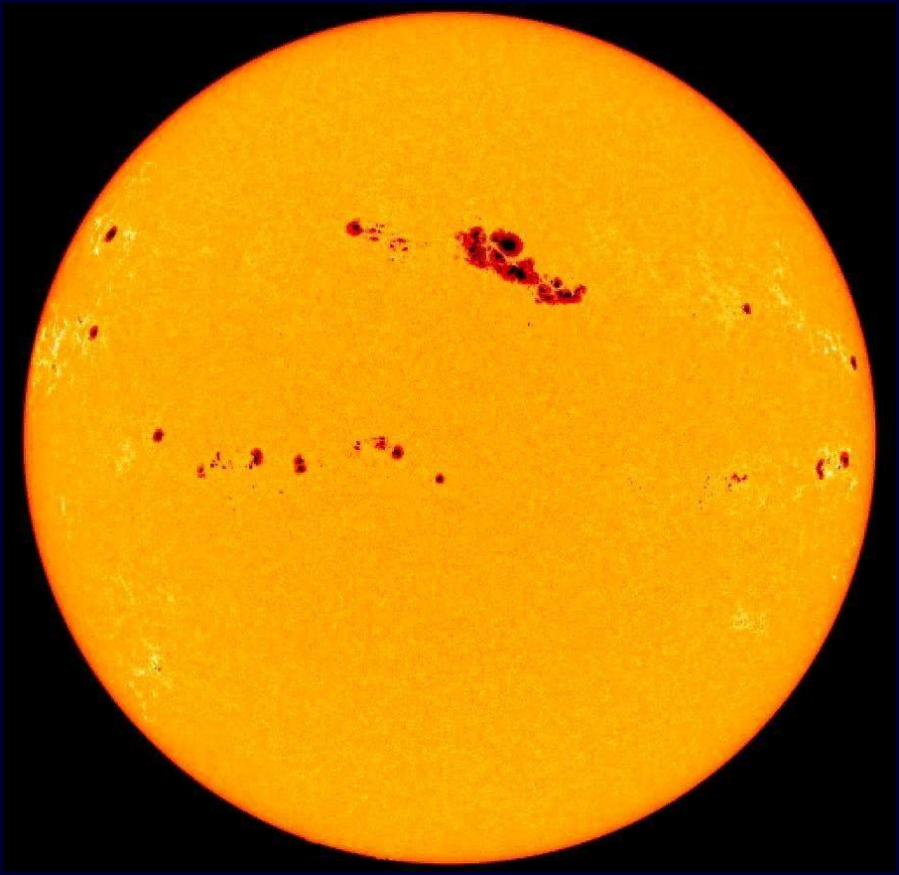
Гарриот

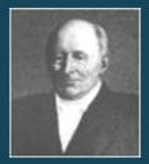


Фабрициус

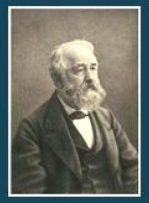

JOH. FABRICII PHRYSII
DE
MACULIS IN
SOLE OBSERVA-
TIS, ET APPARENTE
earum cum Sole conver-
sione,
NARRATIO.
cui
Adjecta est de modo eductionis specie-
rum visibilium dubitatio.
VVITEBERGÆ,
Typis Laurentij Seuberlichij, Impensis Iohan. Bor-
nerri Senioris & Eliæ Rebenlein, Bibliop. Lips.
ANNO M. DC. XI.

Солнечные пятна и их современные индексы





Г.Швабе: число скоплений пятен (“clusters”), с 1826



Р.Вольф: относительное число пятен (число Вольфа), с 1848

У.Деларю: суммарная площадь пятен, 1862-1870 (1832-1870)

SN – относительное число пятен (число Вольфа) – v.2.0
GN – число групп пятен
AR – суммарная площадь пятен

Традиционный индекс для прогнозов – **числа Вольфа SN**
Прогнозируются либо среднегодовые значения, либо сглаженные за 13 месяцев среднемесячные

2. Методы прогнозирования

Сводка методов прогнозов (по *D.Nandy, S.Ph.,2021*)

- Прогнозы, основанные на физической модели
- Прогнозы, основанные на методе предвестников («прекурсоров»)
- Прогнозы, основанные на нелинейных методах
- Статистические прогнозы
- Прогнозы, основанные на спектральных методах
- Машинное обучение и прогнозы на основе нейронных сетей

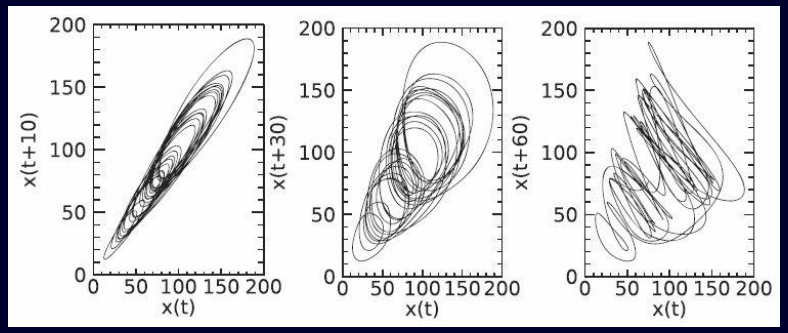
Сводка методов прогнозов (по *D.Nandy, S.Ph.,2021*). ***Изменим порядок изложения:***

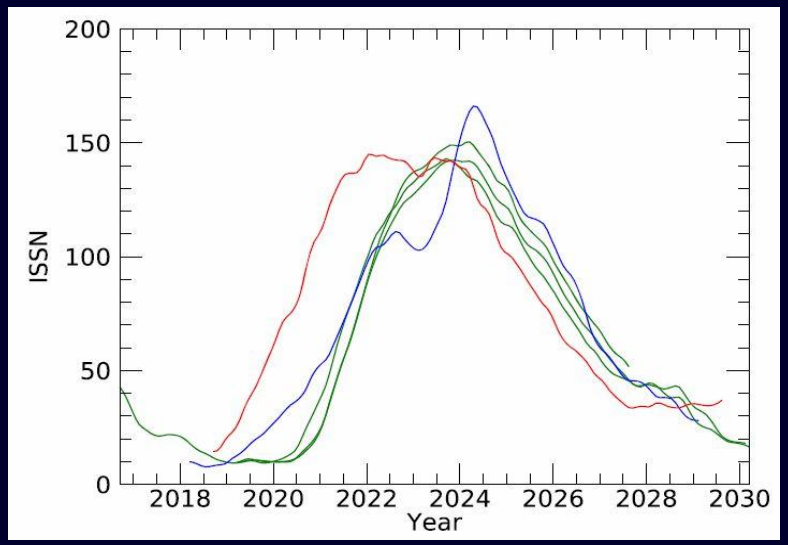
- Прогнозы, основанные на нелинейных методах
- Машинное обучение и прогнозы на основе нейронных сетей
- Прогнозы, основанные на спектральных методах
- Прогнозы, основанные на физической модели
- Прогнозы, основанные на методе предвестников
- Статистические прогнозы

2.1. Прогнозы, основанные на нелинейных методах

Нелинейный алгоритм прогнозирования, основанный на поиске времени запаздывания τ и реконструкции фазового пространства. *Размерность вложения 2-6.*

$$\vec{\mathbf{v}}_{\mathbf{i}} = x_t, x_{t-\tau}, \ldots, x_{t-m-1\tau}$$

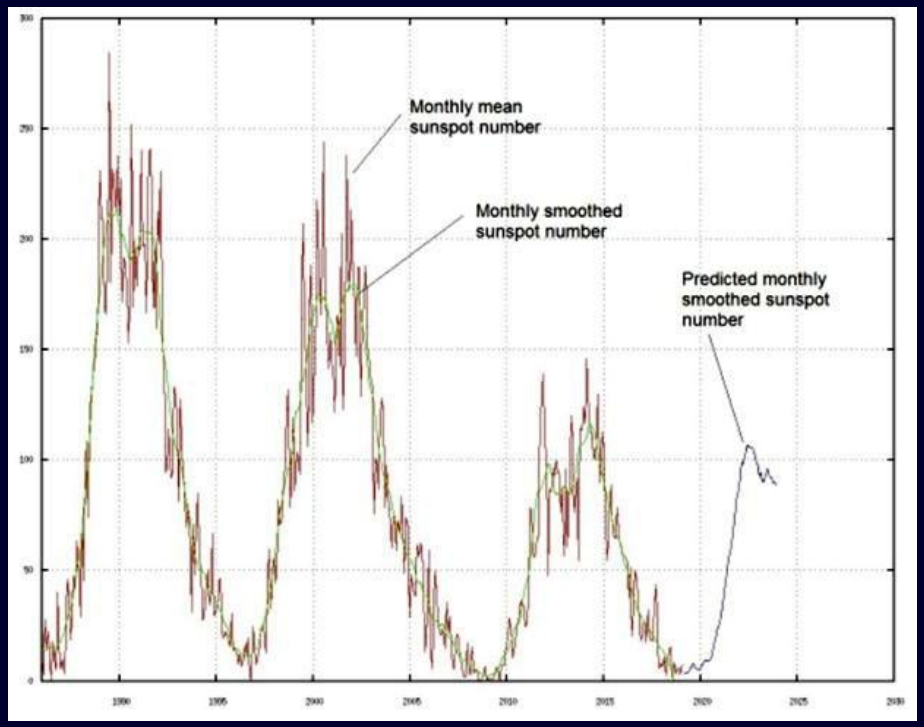




Прогноз:
SN(25) = 154 ± 12
T = 2023.2 ± 1.1

- A) Sarp et al. (2018) *MNRAS* 481

Прогноз на основе «ревизии» методов нелинейной динамики (Zhang, 1996; Sello, 2001) с использова-нием взаимной информации, линейной и нелинейной избыточности, спектра Ляпунова и т.д.



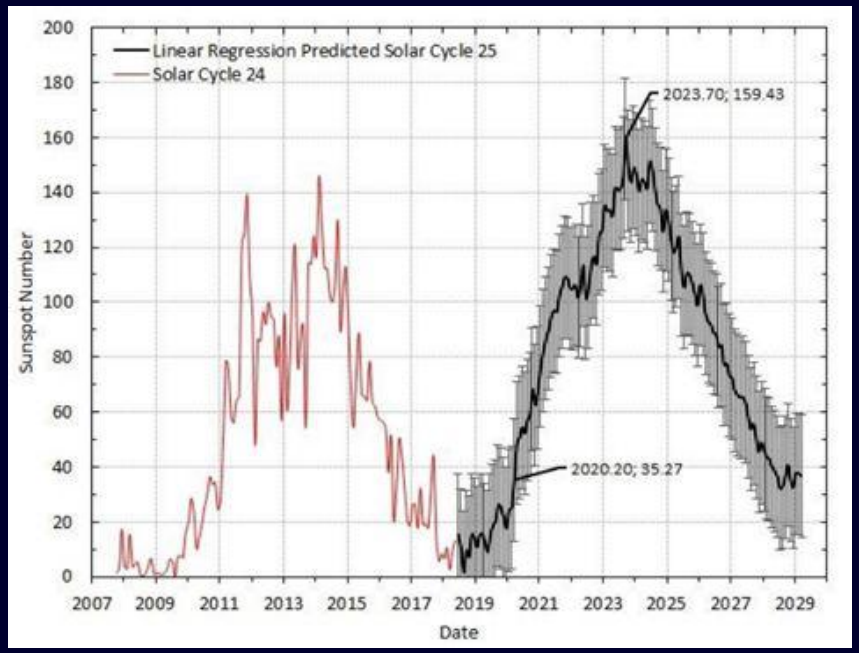
Прогноз:
SN(25) = 107 ± 10
T = 2023 ± 1 yr

- B) Sello (2019) arXiv1902.05294

2.2. Машинное обучение и прогнозы на основе нейронных сетей

Использованы методы машинного обучения на основе 4-х подходов: Linear Regression (LR), Random Forest (RF), Radial Basis Function (RBF), and Support Vector Machine (SVM)

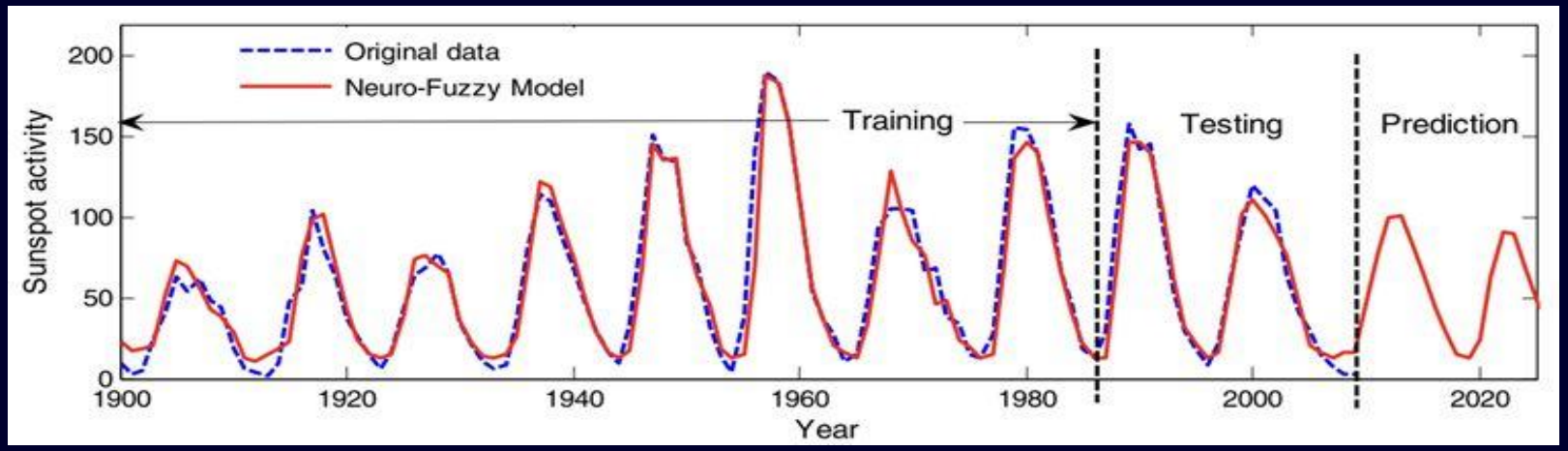
Один из прогнозов (LR):



Получено 4 Прогноза:
LR: SN(25) = **159.4 ± 22.3**
T = September 2023
RF: SN(25) = **110.2 ± 12.8**
T = December 2024
RBF: SN(25) = **95.5 ± 21.9**
T = December 2024
SVM: SN(25) = **93.7 ± 23.2**
T = July 2024

- A) Dani and Sulistiani (2019) *J.of Phys* **1231**

Использовалась нейросетевая модель. Было найдено подходящее количество сетевых входных данных для серии данных о солнечных пятнах на основе последовательного прямого поиска «нейро-нечеткой» модели.

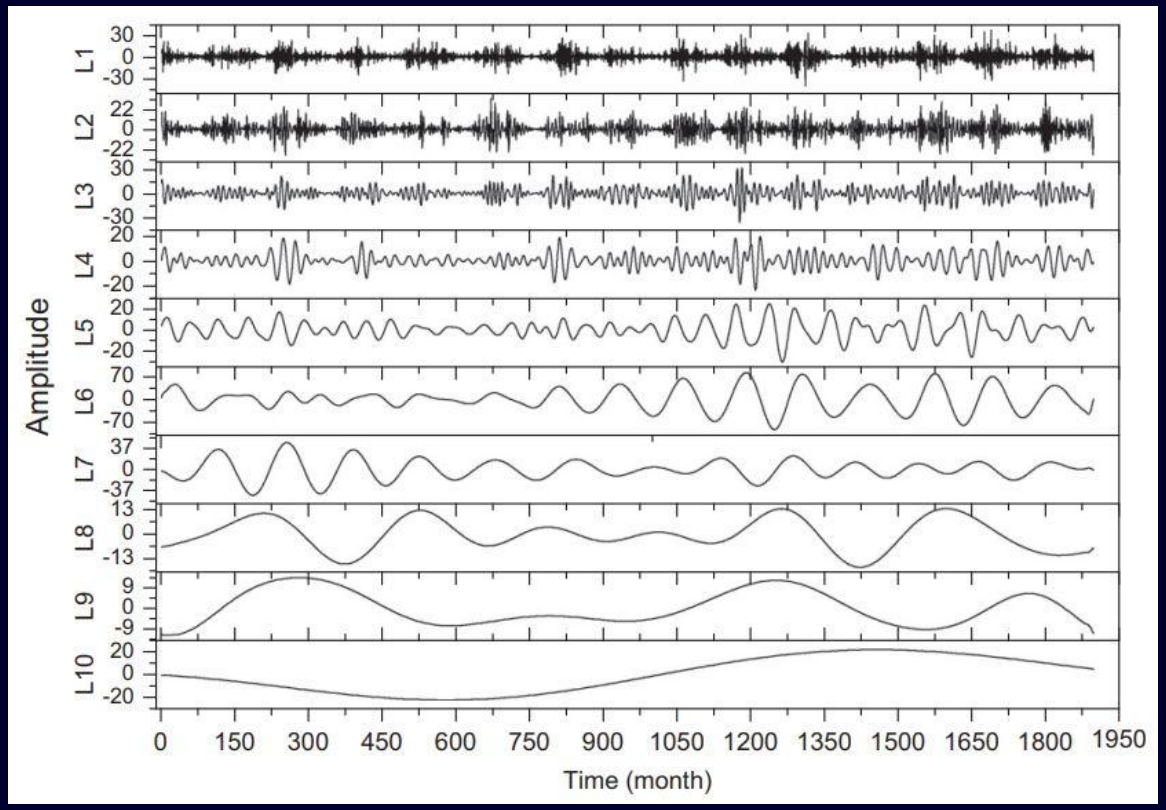


Прогноз:
SN(25) = 90,7 ± 8
T = 2022.

- B) Attia, et al. (2013) *Astrophys Space Sci* **344**

2.3. Прогнозы, основанные на спектральных методах

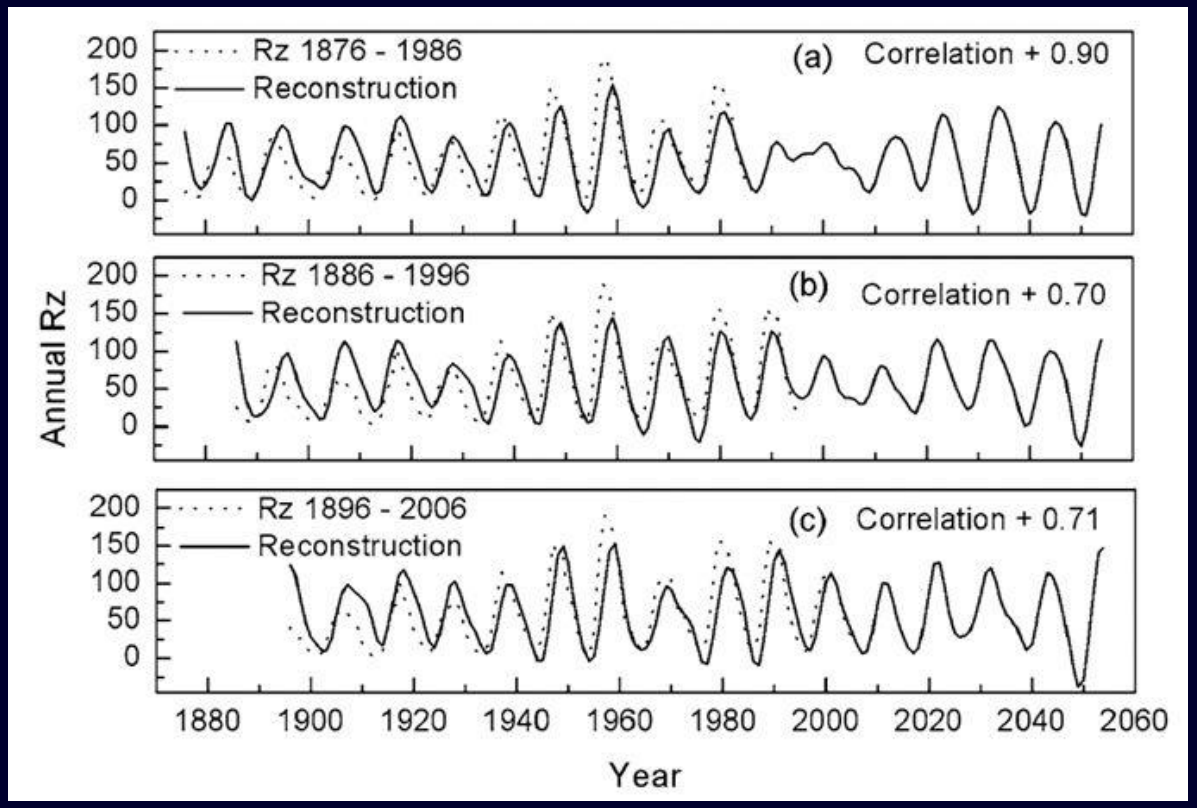
Ежемесячные SN за период 1850-2007 гг. (солнечные циклы 9-23) разложены на вейвлет-компоненты, и с помощью итеративной регрессии восстановлены периодичности для каждой компоненты.



Прогноз:
SN(25) = 132.1
T = April 2023

- A) Rigozo et al. (2011) *J. Atm Sol-Terr Phys* **73**

Для определения периодичностей методом максимальной энтропии (MEM) произведен спектральный анализ SN. Далее сделан множественный регрессионный анализ (MRA) и прогноз.



Прогноз:
SN(25) = 119
(112-127)
T = 2022-2023

- Б) Kane (2007) *Solar Phys* **246**

2.4. Прогнозы, основанные на физической модели

- Surface flux transport (SFT) модель

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\,\Omega(\theta)\frac{\partial B}{\partial \phi} - \frac{1}{R_\odot \sin\theta}\frac{\partial}{\partial \theta}\left[v(\theta) B \sin\theta\right] + \frac{\eta}{R_\odot^2 \sin\theta}\left[\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\sin\theta \frac{\partial B}{\partial \theta}\right) + \frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial^2 B}{\partial \phi^2}\right] - B/\tau + S(\theta, \phi, t)$$

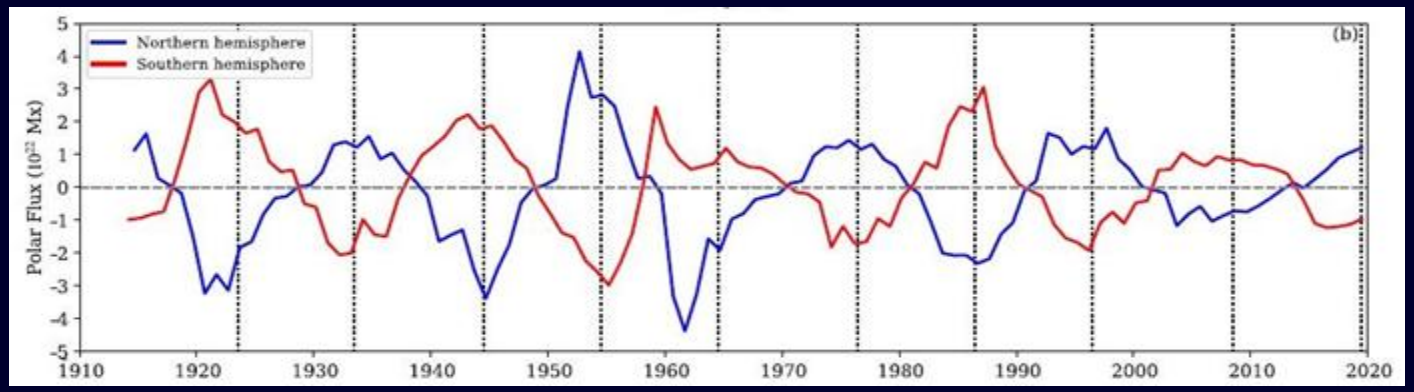
B – радиальное маг. поле; θ, ϕ *– коширота, долгота;*

η *– турб. маг. диффузия;* v *– скорость мерид. течения;*

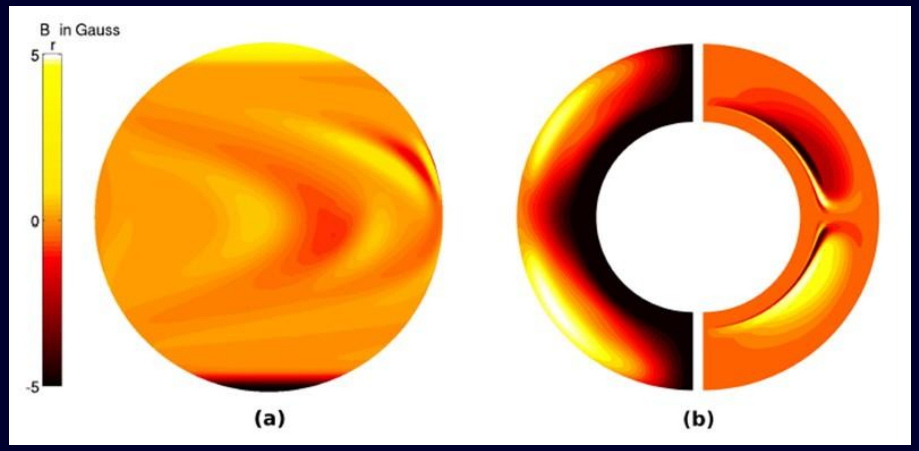
$\Omega(\theta)$ – дифф. вращение

- Обзоры: Jiang et al. (2014) *Space Sci Rev* **186** и Wang (2017) *Space Sci Rev* **210**.
- История: Sheeley (2005) *Living Rev Sol Phys* **2**

- Использована модель SFT, основанная на:



Muñoz-Jaramillo et al., 2012 + Wilcox Solar Obs.

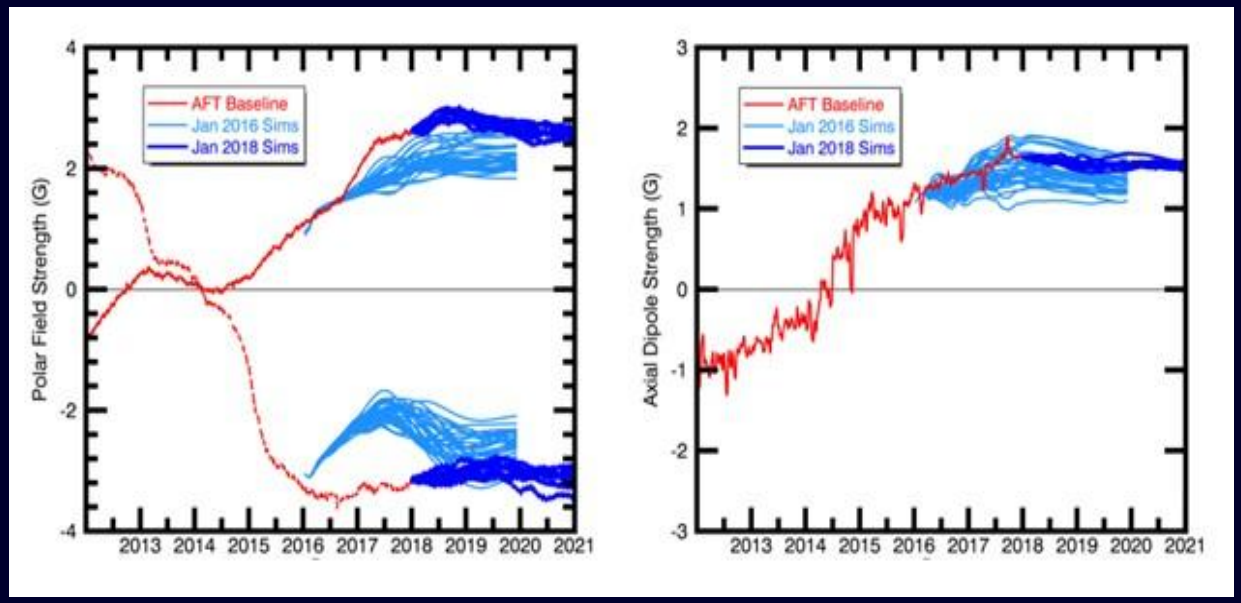


Прогноз
SN(25cy) = 109-155.
T = 2024 (± 1)

A) Bhowmik and Nandy (2018) *Nat. Commun.* **9**

- Advective Flux Transport (AFT) модель

Использована авторская модель переноса адвек-тивного потока (AFT) и эмпирическая зависимость между полярным полем и амплитудой.

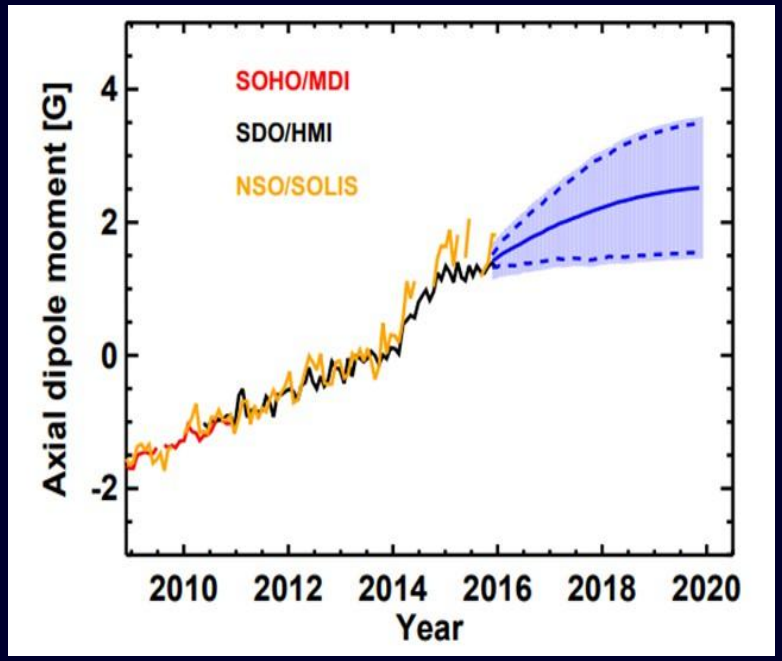


Прогноз:

SN(25cy) = 110.

- B) Upton and Hathaway (2018) *Geophys. Res. Lett.* **45**

Модель SFT для оценки полярного поля в минимуме 24-го солнечного цикла и на ее основе проведена оценка величины 25-го солнечного цикла.



Прогнозируемая эволюция осевого дипольного момента до 2020 года (min) путем моделирования 50 SFT случайных симуляций, на основе синоптических магнитограмм SDO/HMI (NSO/SOLIS).

Прогноз:
SN(25) чуть больше SN(24)

- C) Cameron et al., (2016) Astrophys J Lett **823**

2.5. Прогнозы, основанные на методе предвестников.

«В самом общем смысле методы предвестников основаны на значении некоторого показателя СА или МП в определенное время для прогнозирования амплитуды следующего солнечного максимума. Предшественником может быть любой показатель солнечной активности или показатель солнечного или межпланетного или земного магнетизма. *В частности, предвестником также может быть значение числа солнечных пятен в данный момент времени»* (последние методы мы рассмотрим чуть позже как «статистические» – ЮН).

- Petrovay (2020) *Living Rev Sol Phys* **17**

Связь между СА и геомагнитными возмущениями (ГВ) была замечена еще в 19 в. (+Р.Вольф тоже). Однако, она неоднозначна, ГВ обусловлены двумя причинами:
а) вспышечная и СМЕ активность, в целом коррели-рующая с ходом цикла;
б) напряженность общего ММП, обусловленного открытыми конфигурациями (корональными дырами) – отражениями «зародыша» будущего цикла – в минимуме цикла.

! Метод Оля основан на связи минимальных значений геомагнитного аа-индекса между 11-yr циклами СА с максимумами SN следующего цикла.

- А) Пионерская работа – А.И. Оль (1966) *Солн Данные* 12

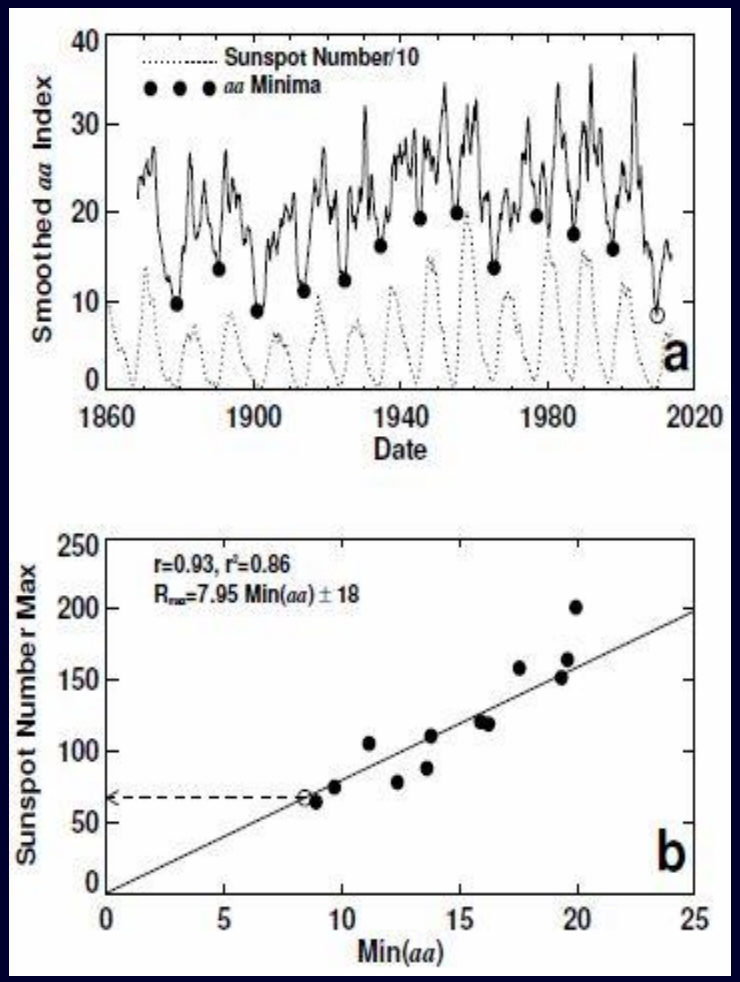


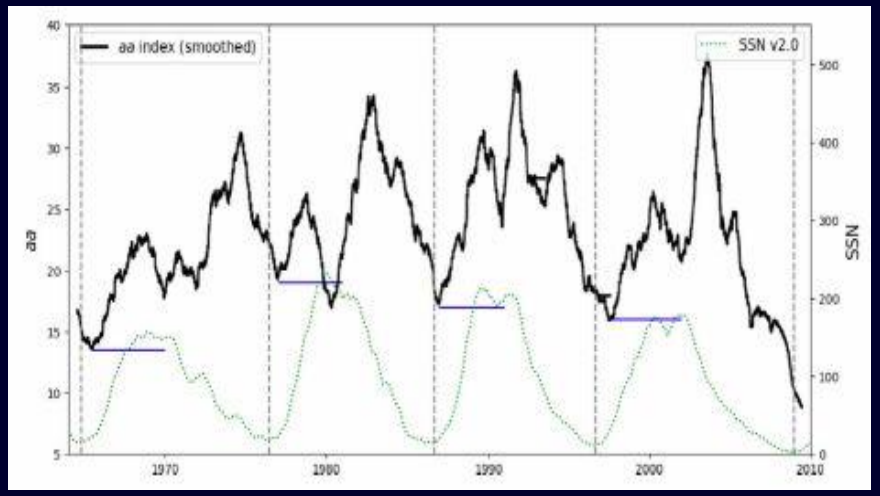
Иллюстрация метода Оля по Hathaway, 2020.

Сверху: черные кружки – минимальные значения аа-индекса, пунктир – SN версии 1.0.
Снизу – соответствующая корреляция (R = 0.93)

- B) Hathaway (2020) *Living Rev Sol Phys* **12**

Дж.Фейнман (1982) прояснила метод Оля, отделив «медленную» составляющую в аа-индексе и назвав ее «межпланетной компонентой». Изучение ММП-компоненты и модификация метода Оля:

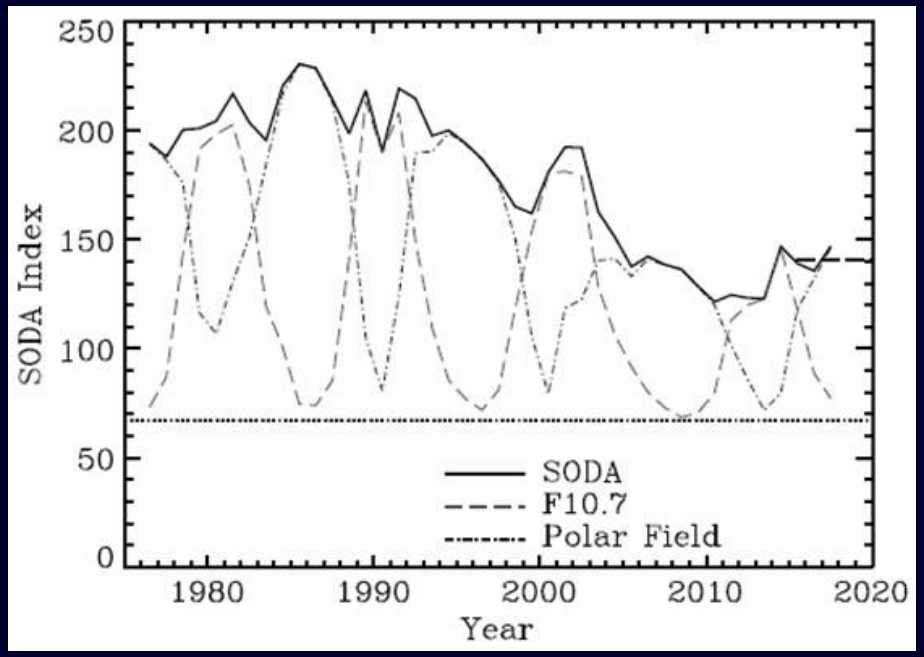
- Svalgaard and Cliver (2005, 2007); Rouillard et al. (2007); Bhatt et al. (2009); Wang & Sheeley (2009); Pesnell (2014)…



Petrovay (2020): «…несмотря на его более ограниченное практическое применение, оригинальный метод Оля, основанный на минимумах индекса аа, является физически более обоснованным», чем некоторые модификации.

- C) Feynman J. (2018) *J Geophys Res* **87**

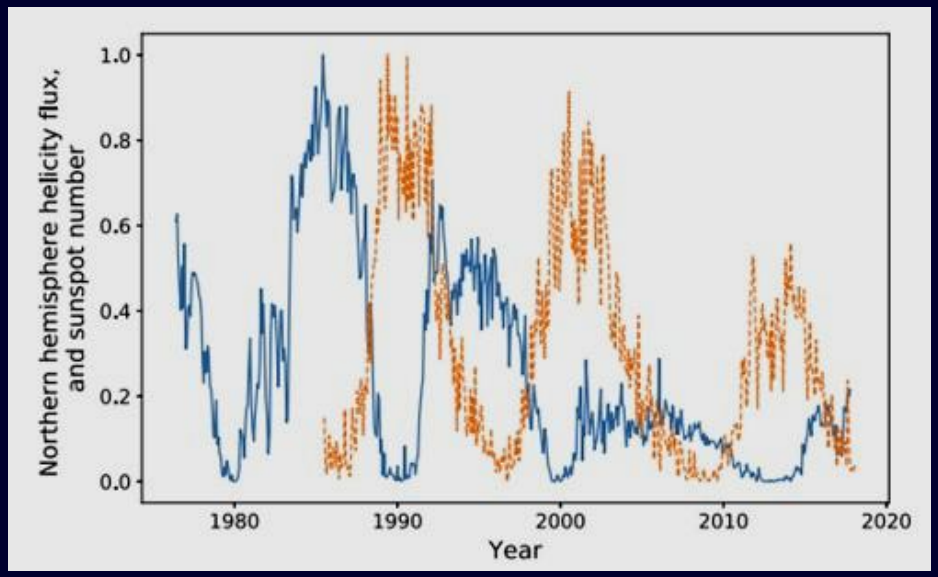
Песнелл и Шаттен (2018) использовали индекс солнечного динамо (SODA), объединяющий значения полярного магнитного поля Солнца и спектральной освещенности Солнца на 10.7 см.



Прогноз:
SN(25) = 135 ± 25
T = 2025.2 ± 1.5

- B) Pesnell and Schatten (2018) *Solar Phys.* **293**

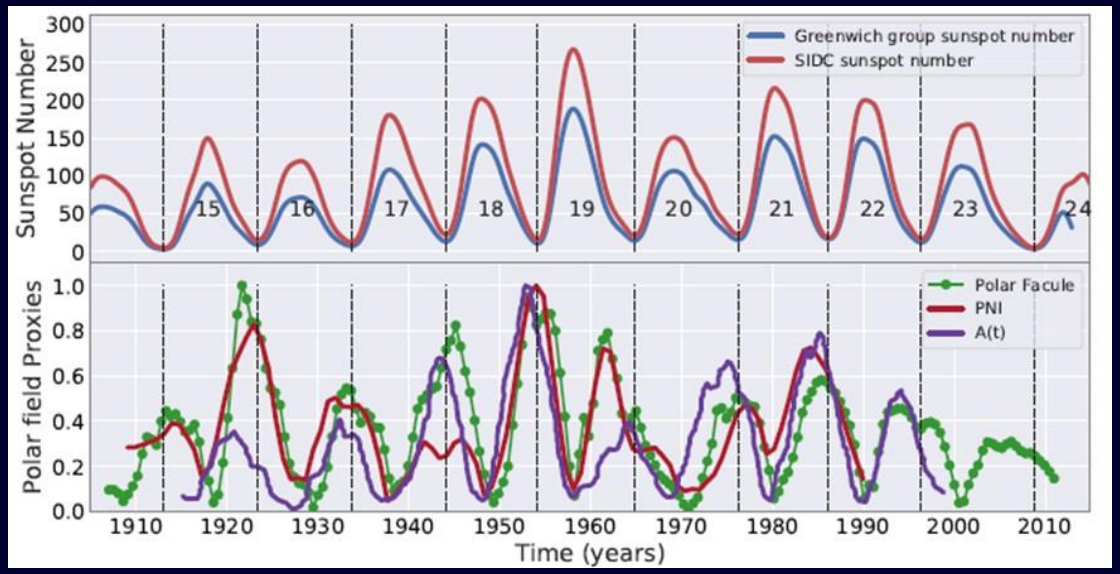
Хоукс и Бергер (2018) рассчитали поток спиральности через полушария, используя модель, учитывающую Омега-эффект, на основе данных WSO (длина 60 лет). Применялись различные методы корреляционного анализа между потоком спиральности и временными рядами солнечных пятен.



Прогноз:
SN(25) = 117

- C) Hawkes and Berger (2018) *Solar Phys* **293**

Использована составная формула на основе данных: о полярных факелах (нормированных на WSO), диполь-октупольном индексе (Makarov et al., 2021) и индексе полярной сетки (Polar Network Index) – Кодайканал.



Прогноз:
SN(25) = 138-143

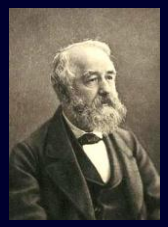
- D) Hazra and Choudhuri (2019) *Astrophys J* **880**

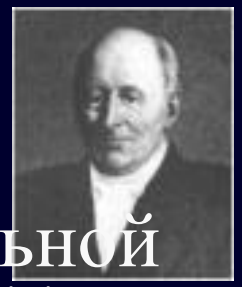
2.6. Статистические прогнозы

«Существует три вида лжи: ложь, наглая ложь и статистика» (Б.Дизраэли)

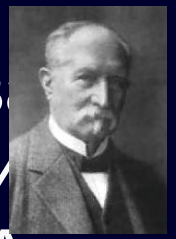
Методы предвестников и методы, основанные на физических моделях, уже не требуют “легитимизации” в наше время. Методы нелинейной динамики и подходы типа искусственного интеллекта обещают «решить все задачи» (цитата из Р.Декарта). А что старые добрые статистические методы поиска связей во временнЫх рядах? Может быть, они уже устарели? Отражают только отдельные врЕменные связи в индексах? Если мы верим в $\alpha \rightarrow \omega \rightarrow \alpha \rightarrow \omega \rightarrow \ldots$ динамо, то физика этого процесса неминуемо должна быть отражена в той или иной форме во внутренних связях традиционных индексов, полученных из наблюдений. Поэтому не стоит отвергать статистические методы прогнозов только на основании их «несовременности».

Истоки статистического подхода



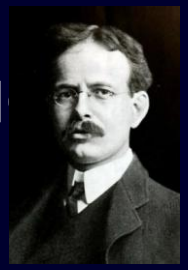


Р. Вольф: Расширение экспериментальной базы СА. Заключение: возможно, 11-летние циклы бывают двух типов



Д. Кортевег (тот самый → KdV): есть два типа циклов разной продолжительности

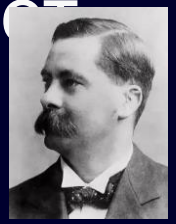
Э.У.Маундер: особое состояние СА – грандиозный минимум; «бабочки»



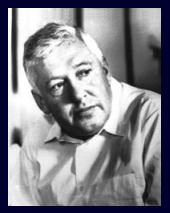
Дж.Э.Хейл: в точном смысле цикл – 22-летний

Эффект М.Вальдмайера

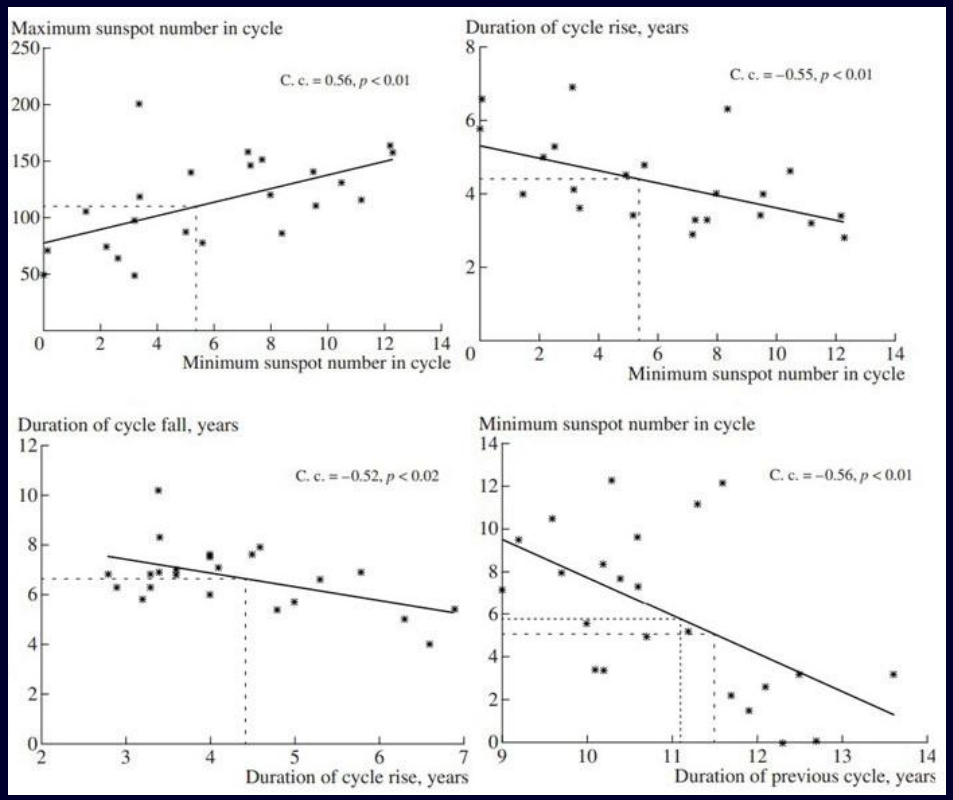
Тернер и Людендорф – различие Чет-нечет



М.Н.Гневышев и А.И.Оль – объединение циклов в пары



Итак, далее -- статистические подходы.
Использовано несколько корреляций: SN_M (SN_m), длины ветви роста от SN_m, длины ветви спада от дл. ветви роста, SN_m от длительности предыдущего цикла.



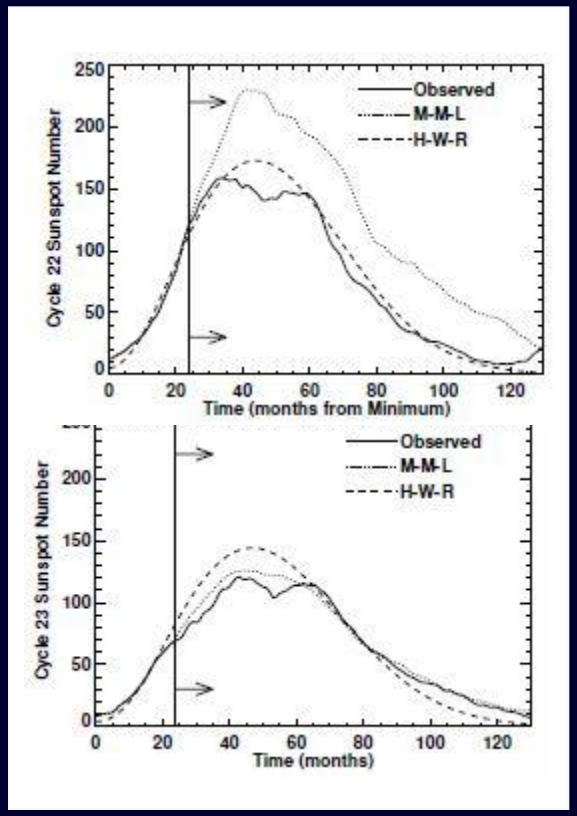
Коэффициенты корреляции 0.5-0.6.

Объединение рез-в:

Прогноз:
SN(25) = 112.4 ± 33.4
T = 2023.4 ± 0.7

- Pishkalo (2008) *Kinemat Phys Celest Bodies* **24**

Метод **Мак-Ниш–Линкольн**: а) отталкиваемся от “среднего” цикла; б) прибавляем поправку, пропорциональную отклонениям SN предыдущих лет. Т.е. реализуем

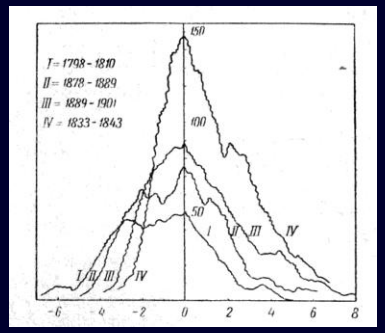


своеобразный регрессионный метод. Хатауэй и др. модифицировали такой способ, подгоняя форму цикла к двух-параметрической кривой. Ю.И.Витинский (1973): прогнозы по этому методу «уступают в точности другим… и поэтому менее пригодны для практического использования».

Прогноз:
SN(25) = **?**

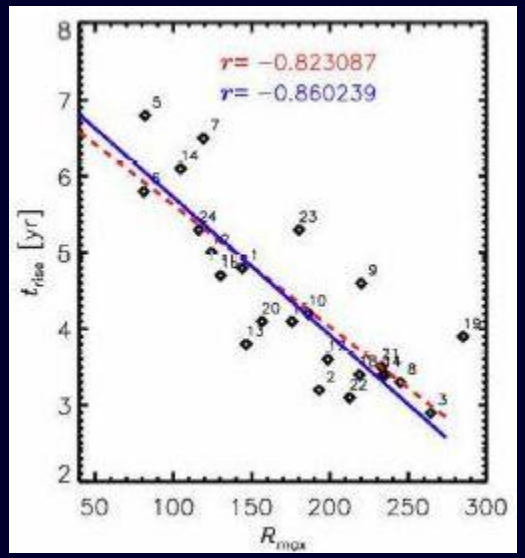
- McNish & Lincoln (1949) *Eos Trans. AGU* **30**
- Hathaway et al.(1994) Solar Phys **151**

Правило Вальдмайера (макс.SN_M vs длина ветви роста τ)

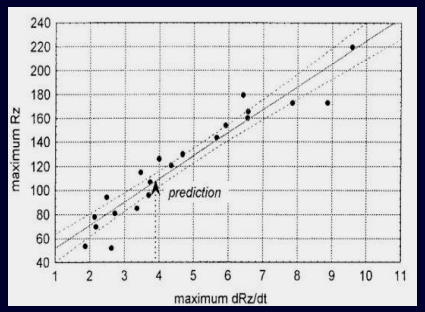


Истоки:
«Бóльшая активность на Солнце проявляется в более короткие периоды и меньшая - в более длительные. Я полагаю, что этот закон является одним из наиболее важных соотношений между действиями Солнца, которые еще не обнаружены» (Р. Вольф, 1861)

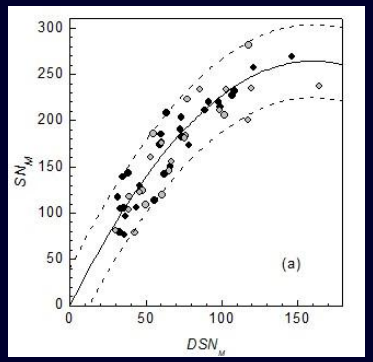
Waldmeier, 1935: $SN_M = A - B \cdot \tau$



Модиф ПВ: Заменим τ максим. скоростью роста СА на ветви роста цикла



Dmitrieva et al. (2000) *Sol Phys* **195**.

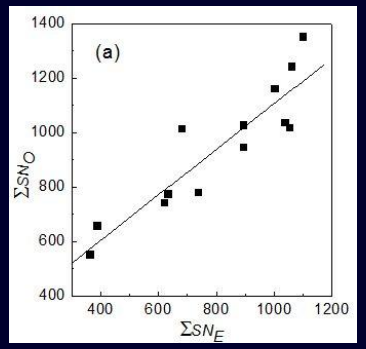


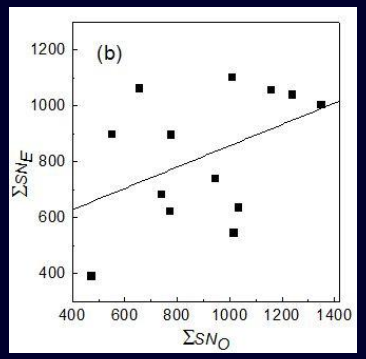
Nagovitsyn et al.(2015) *Sol Phys* **290**

Прогноз (v.2.0):
SN(25) = **145 ± 22**

- Lantos (2000) *Sol Phys* **196**
- Cameron&Schussler (2008) *Astrophys J* **685**….

Правило Гневышева-Оля (1948) *Астрон Ж* 25



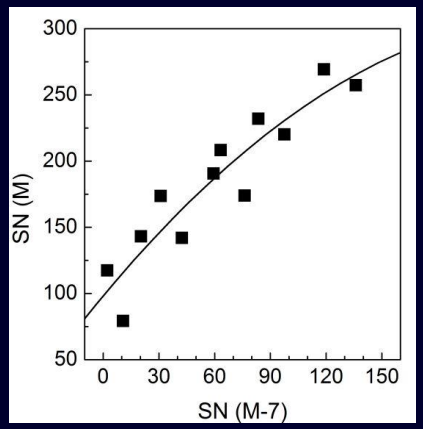


ΣSN: R(Ч→Н) = **0.91**(±0.11); R(Н→Ч) = **0.44**(±0.24)
Дисперсии по F-критерию различаются с *p*=0.99(!)
Таким образом, ПГО фиксирует обусловленность нечетного цикла предыдущим четным. А есть ли связи из нечетного в следующий четный?

Cameron & Schüssler (2007), Brajša (2022) обратили внимание на корреляцию SN(max) vs SN(min-3) (●)
По Brajša прогноз SN(25) = 130 ± 35, R = 0.81.

Nagovitsyn & Ivanov (2023) рассмотрели (●) для четных и нечетных циклов отдельно. Получилось, что на ветви спада нечетного цикла за 3 года до min SN_{m-3} коррелирует с SN_M следующего четного цикла с R = 0.94 (!), а для нечетного цикла – только с R = 0.75. Т.обр., найдена комплементарная к ПГО связь из Н в Ч цикл и +можно хорошо предсказывать четный цикл: SN(24) = 123 ± 19 [*ucm.*113.3]. **Назовем предиктор Mi3**.

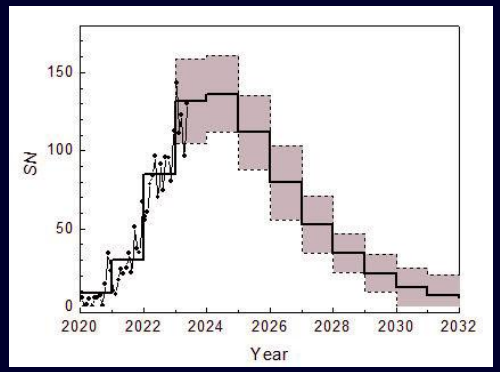
SN предикторы на ветви спада: Ю.М.Слоним (1984) *CD* 5



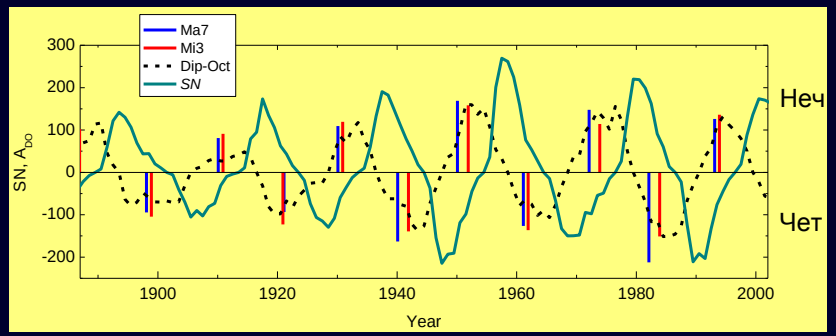
Nagovitsyn&Ivanov (2023) *Solar Phys* **298** рассмотрели идею SN(M-Δ) vs SN(M) с учетом четности циклов. Наилучшее Δ = 7 лет. Для прогноза нечетного цикла с R = 0.93 слабо-нелинейное выражение

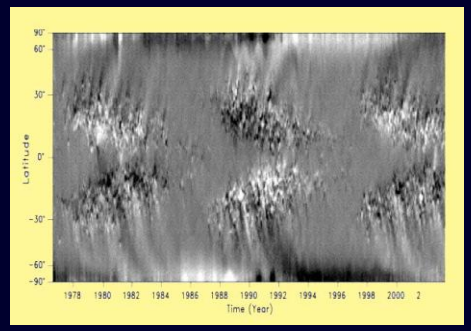
$$SN_{\mathrm{M}} = (98 \pm 17) + (1.68 \pm 0.59)\,SN_{\mathrm{M-7}} - (3.4 \pm 4.3) \times 10^{-3}\,SN^2_{\mathrm{M-7}}$$

Прогноз: SN(2023) = **132 ± 27**; SN(2024) = **136 ± 25;** T = **2024.0**



Назовем предиктор Ma7. (Подход позволяет прогнозировать и другие годы).



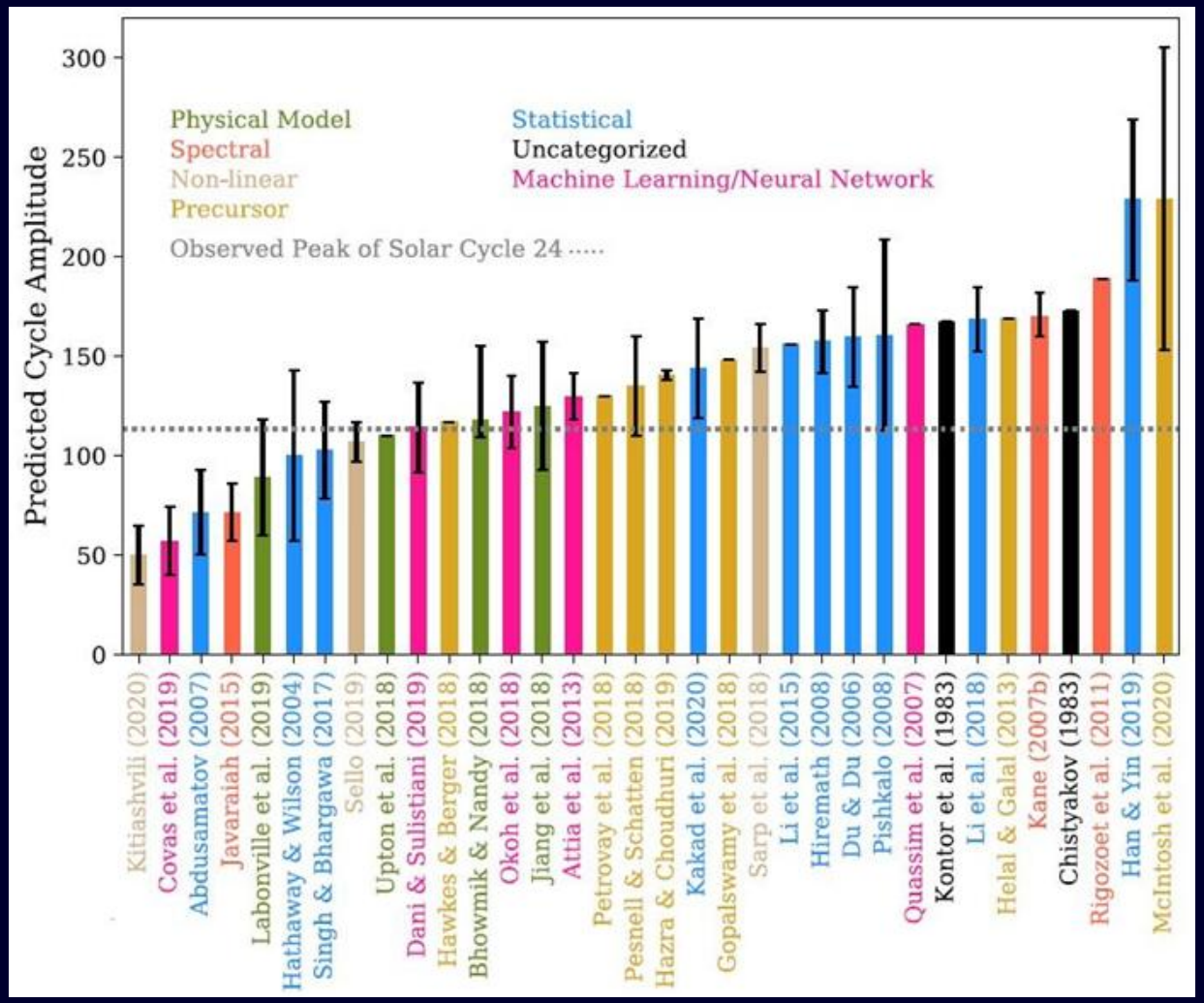


Mi3 + Ma7 :
Возможные физичес-кие обоснования:

(Альтернированные циклы – представление по Bracewell,1953)

3. Подытоживая…

Nandy (2021): сводка прогнозов цикла № 25



По типам прогнозов

- Статистические: 10
- Предвестники: 7
- ML и нейросети: 5
- Физ. модели: 4
- Спектральные: 3
- Нелинейные: 3
- Вне категорий: 2

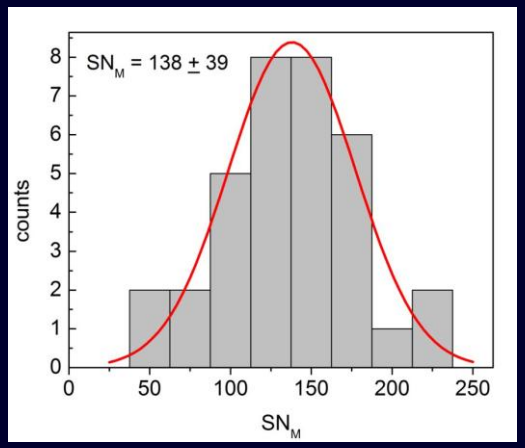
Среднее значение прогноза из 34-х:

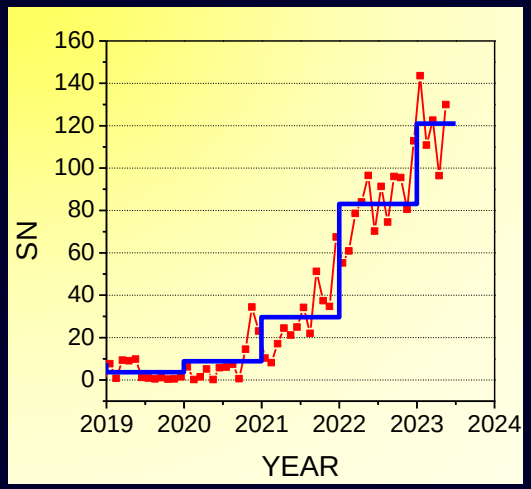
SN(25) = 136 ± 42

Сводка прогнозов цикла № 25 по типам (p=0.95):

- Статистические: 121 ± 32
- Предвестники: 145 ± 29
- ML и нейросети: 100 ± 24
- Физ. модели: 111 ± 16
- Спектральные: 100 ± 51
- Нелинейные: 104 ± 60

T_M = 2022 – 2025 гг.



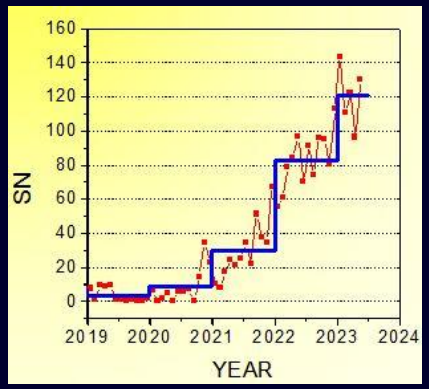


Результаты и выводы:

- Если мы верим в α - ω динамо, мы должны заключить, что методы, основанные на физических моделях, методы предвестников и статистические методы по сути не противоречат друг другу и перспективны
- Спектральные методы (но только не основанные на «дальнодействии») могут также помочь в прогнозе, поскольку связаны с «физическими»
- Нелинейные методы, методы машинного обучения и нейропрогноза демонстрируют величие современной математики, но требуют физического контекста
- «Демократический» прогноз следующего, 25-го цикла: **SN(25) = 136 ± 42; T_M = 2023.5-2025.0**

И это еще не все →

Вопросы, возникающие в связи с изложенным:

- Какой индекс надо прогнозировать? Действительно ли SN?
- Солнечные активные области и пятна гомогенны или образуют (по кр.мере, две) разные популяции и как это отражается на возможностях прогнозирования?
- Какой временной интервал является оптимальным для прогнозирования?
- На какой максимальный временной интервал мы можем прогнозировать СА с разумной точностью? «Память»?
- Как в целом организовано сопряжение соседних циклов? Какую роль играет четность циклов с физической т.зр.?
- Солнечное α–ω динамо в целом хорошо описывает 11-летний цикл и нуждается только в уточнении деталей? Насколько удачно оно способно описать секулярные (Гляйссберга, Зюсса и др.) циклы?

Спасибо за внимание !