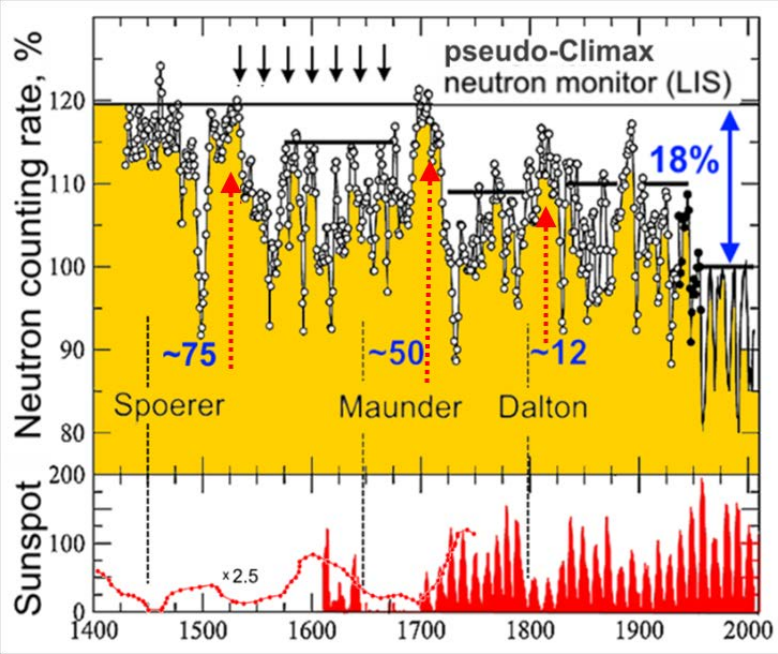
Прогноз долговременной модуляции космических лучей

Кобелев П.Г., Трефилова Л.А., Белов А.В., Гущина Р.Т., Янке В.Г.

В прошлом наблюдались периоды с очень низкой солнечной активностью, например, период Маундера. При этом должен быль наблюдаться повышенный поток галактических космических лучей, достигающий межзвездных значений. Какие потоки КЛ можно ожидать в будущем, в 25 цикле СА и в более далекой перспективе**?**



Задачи

На основании имеющихся прогнозов солнечных параметров и модельных данных о связи характеристик солнечной активности с модуляцией галактических КЛ:

1) провести для 25 цикла солнечной активности долгосрочный прогноз потока космических лучей,
2) провести климатический прогноз потока космических лучей на текущие столетия.

Наблюдаемые (с 1951) и оцененные (1428-1954 гг.) вариации на 10 ГВ.
Линия LIS – интенсивность КЛ за пределами гелиосферы. [McCracken & Beer, 2007; McCracken et al., 2007].

Модель вариаций космических лучей

Для выполнения задач необходимо:

a) На базе исторических данных построить модель вариаций космических лучей

b) Использовать опубликованный прогноз параметров СА.

c) Прогнозируемые параметры + модель вариаций КЛ => оценить ожидаемые вариации КЛ.

“Полная “ многопараметрическая модель [Belov et al., 2021] вариаций космических лучей имеет вид:

$$v(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{m} a_k \cdot X_k(t)$$

где a_k определяемые коэффициенты уравнения регрессии, m=5 число параметров модели.

Модель базируется на параметрах: полярное поле Солнца B_{pole}, среднее магнитное поле Солнца на поверхности источника солнечного ветра , B_{ss}, наклон токового слоя η_{HCS}, CMEi индекс , и площадь приэкваториальных корональных дыр A_l или X_k = (B_{pole}, B_{ss}, η_{HCS}, CMEi, A_l).

При учете запаздывания используются параметры, вычисленные как

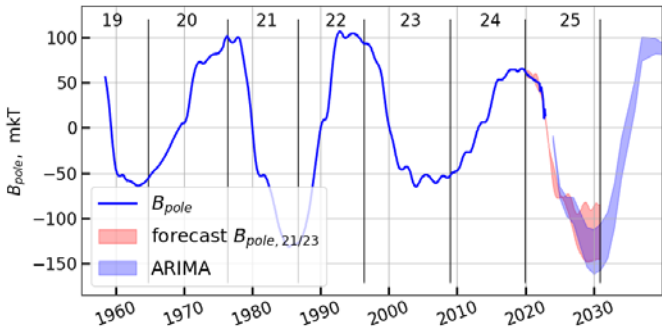
$$X_k(t) = \frac{\sum_{\tau=0}^{\tau_m} F_k(t-\tau)}{\tau_m + 1}$$

Упрощенная (однопараметрическая) модель вариаций космических лучей содержит один параметр $\mathbf{R_z}$

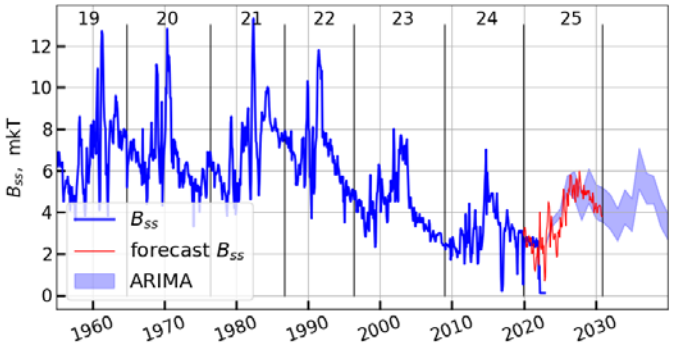
$$V(t) = a_0 + a_1 R_z$$

Параметры СА - измерения и прогноз

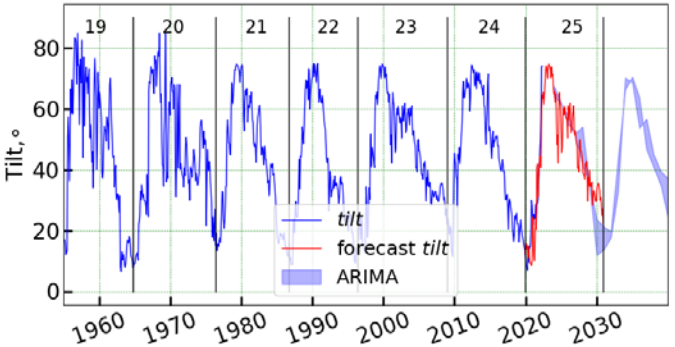
Синяя – реальные значения, красная –аналитический прогноз, голубая –прогноз ARIMA для 25-26 СА



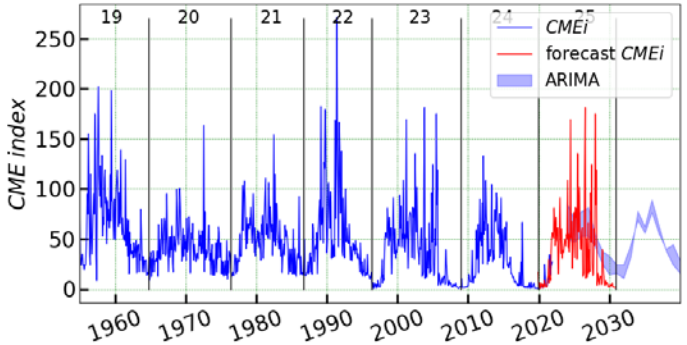
Полярное поле Солнца. [http://wso.stanford.edu/Polar.html]



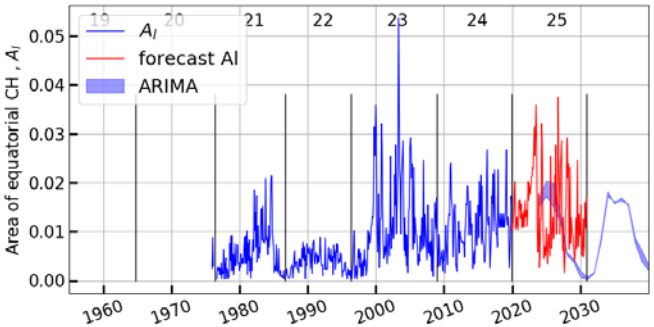
Среднее магнитное поле Солнца на поверхности источника SW.



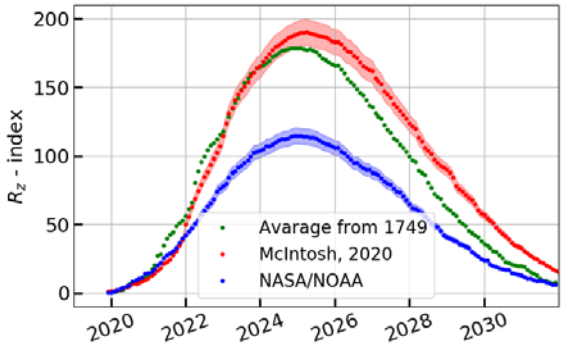
HCS http://wso.stanford.edu/Tilts.html



CME – индекс



Al – Площадь приэкваториальных корональных дыр

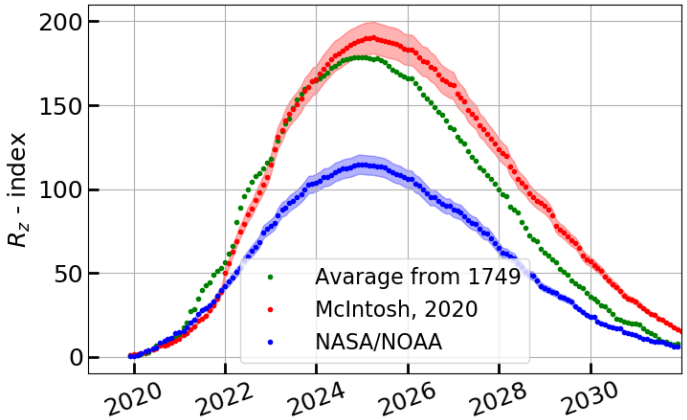


Rz согласно NASA/NOAA https://www.swpc.noaa.gov (синий) и работы [McIntosh et al., 2020] (красная). Показан также средний временной ход числа пятен с 1749 года (зеленый).

Для Модель-5 параметры B_{pole}, B_{ss}, η_{HCS}, CMEi, A_l

Для Модель-1 параметр R_z

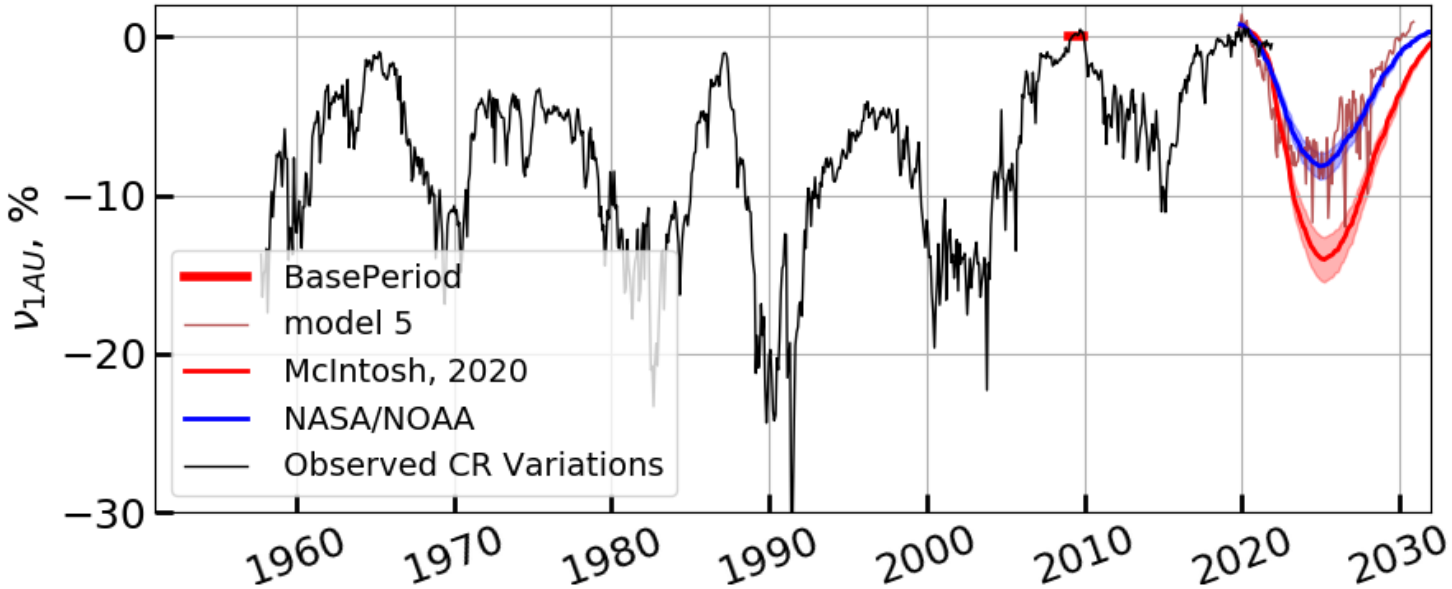
I. Ожидаемые вариации КЛ в 25 цикле СА



Прогноз числа солнечных пятен Rz на 25 цикл СА по данным NASA/NOAA (синяя) и про данным работы [McIntosh et al., 2020] (красная).

Модель вариаций в однопараметрическом (Rz) приближении для частиц 10 GV $\boxed{v(t) = a_0 + a_1 R_z .}$

Уравнение регрессии v_{10} = (-1.42±0.13) – (0.078±0.001) R_z [%]

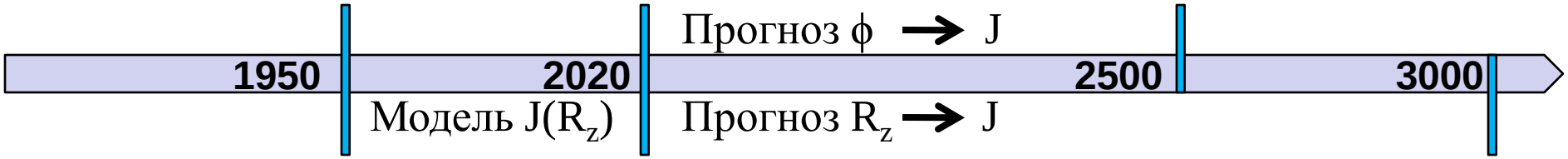


Сравнение измеренных вариаций КЛ (10 GeV) и ожидаемых вариаций в 25 цикле СА по данным прогнозов числа солнечных пятен NASA/NOAA (синяя) и работы [McIntosh et al., 2020] (красная кривая). Показаны также ожидаемые вариации (коричневая), полученные в соответствии с пяти-параметрической моделью M(A_I, CMEi, η_{HCS}, B_{ss}, B_{pole})

Уравнение регрессии

v_{10} = 2.24 - 179×A_I -0.043×**CMEi** - 0.011×η_{HCS} - 0.81×B_{ss} - 0.0023×B_{pole}

II. Прогноз интенсивности космических лучей в климатическом масштабе



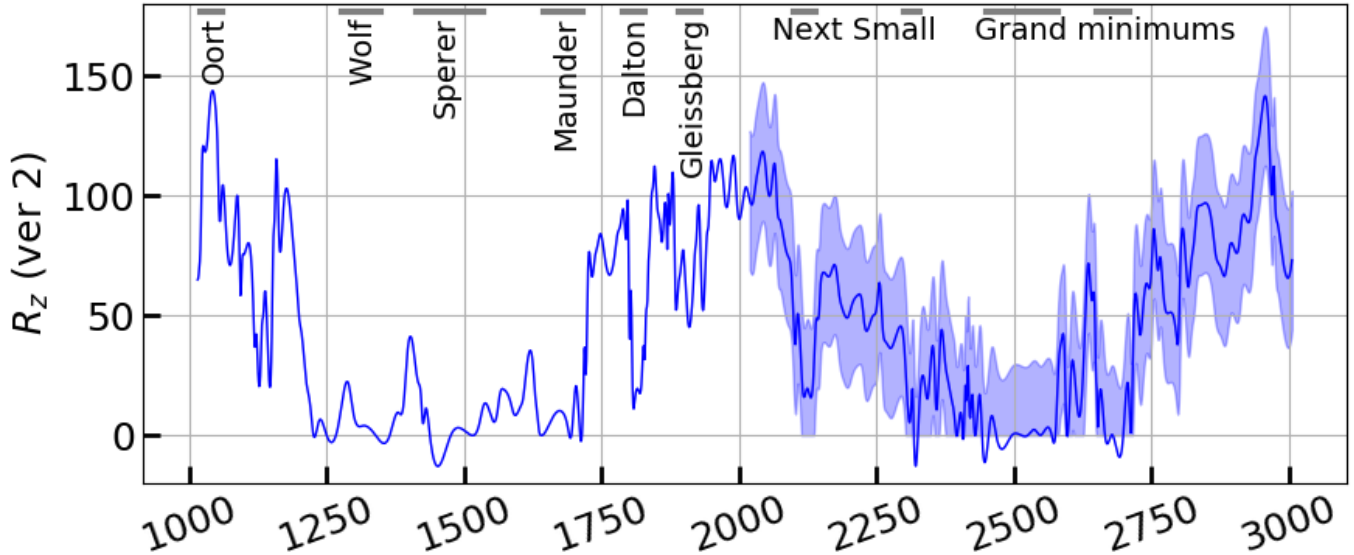
В работе [Rigozo et al., 2010] сделан прогноз числа солнечных пятен до 3000 года.
В данном случае следует ограниситься упрощенной (однопараметрической) моделью вариаций космических лучей $V(t) = a_0 + a_1 R_z X$.

В работе [Steinhilber et al., 2013] сделан прогноз потенциала солнечной модуляции до 2500 года, и для оценки энергетического спектра галактических космических лучей вблизи Земли можно просто использовать приближение силового поля [Vainio et al., 2009]:

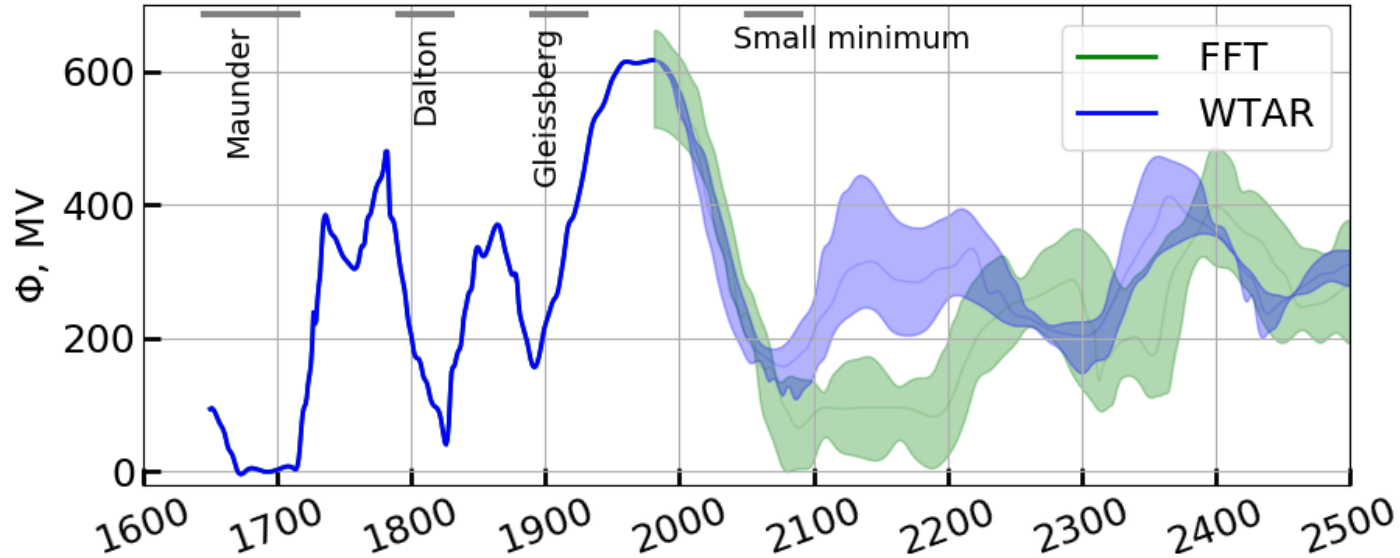
$$J_i(r,K,\phi) = J_{LIS,i}(\infty, K+\Phi_i)\frac{K(K+2m)}{(K+\Phi_i)(K+\Phi_i+2m)}$$

где K кинетическая энергия на нуклон, $\Phi_i(r, t)=(eZ_i/A_i)\phi$ - средние потери энергии частиц с зарядом Z_i и массовым числом A_i в гелиосфере, определяемые потенциалом модуляции ϕ.

Прогноз солнечных и гелиосферных параметров

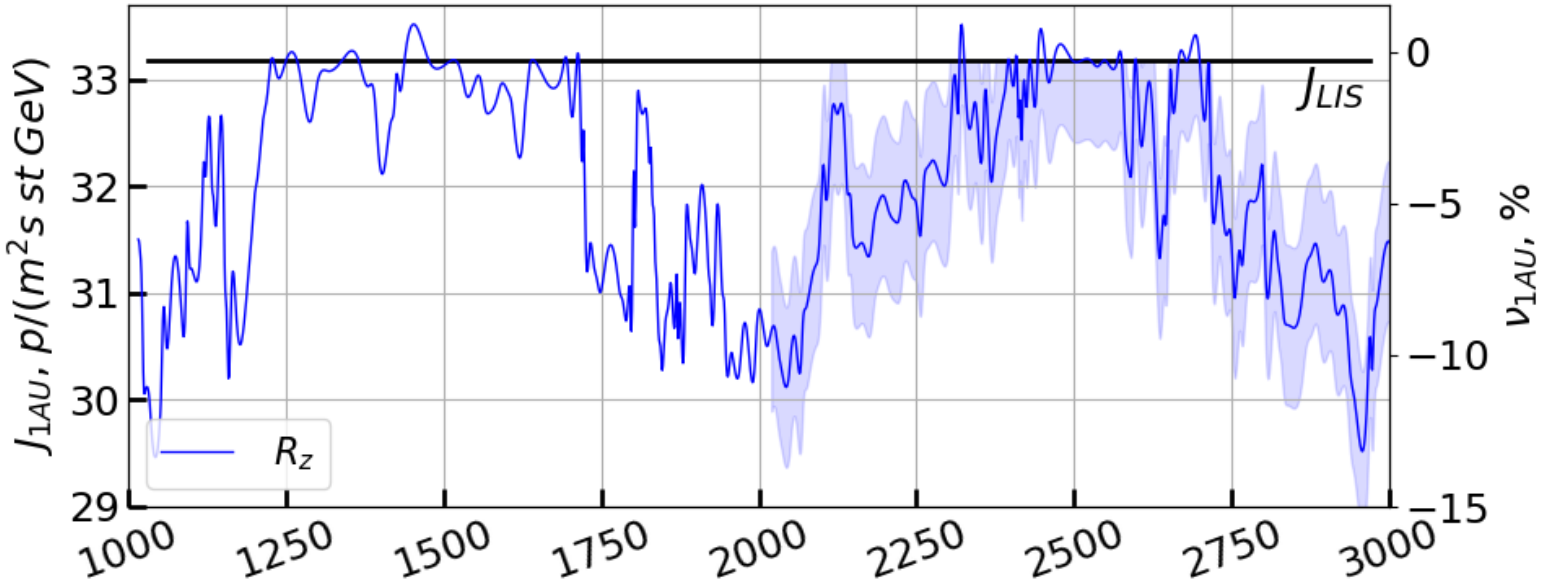


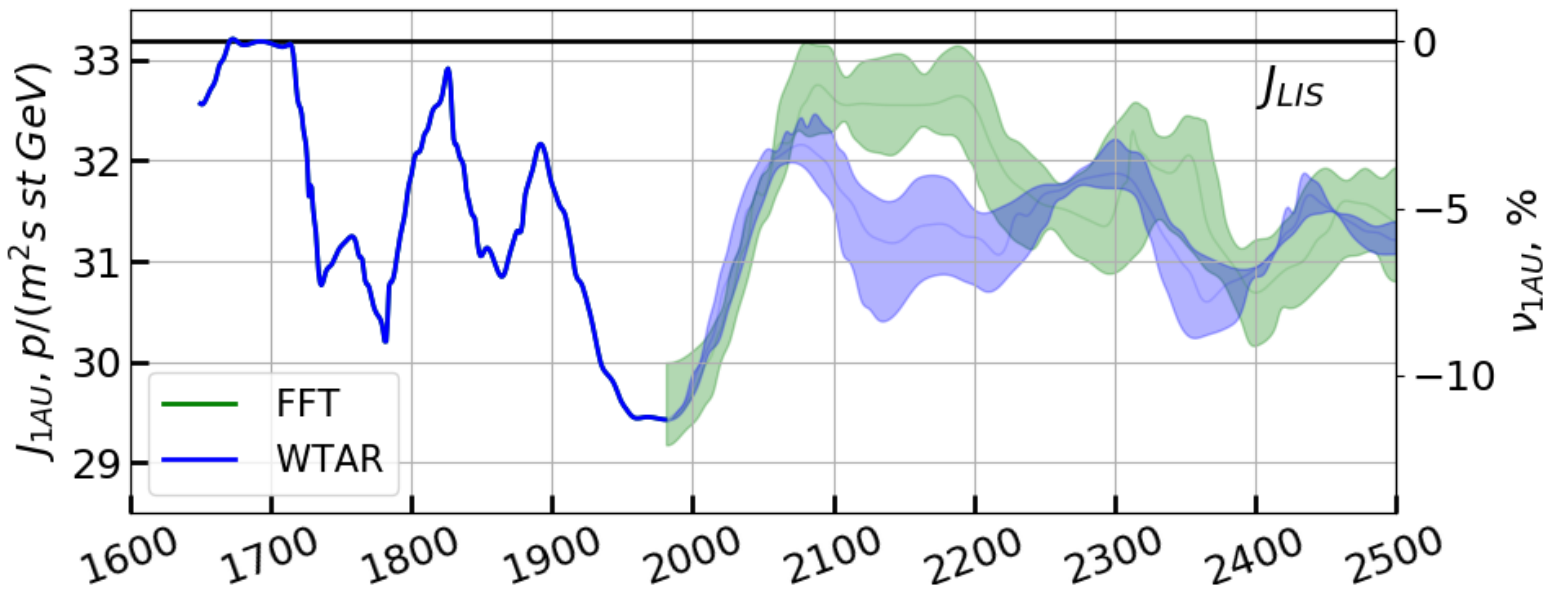
Временной ряд среднего прогнозируемого количества солнечных пятен для периода 1016–3006 гг. и оценка ошибки прогноза [Rigozo et al., 2010] (22-летнее сглаживание).



Прогноз потенциала солнечной модуляции Φ для двух моделей (FFT, WTAR) на следующие 500 лет. Большие солнечные минимумы в прошлом отмечены заглавными буквами. (М: Маундер, Д: Далтон, Г: Глейсберг) [Steinhilber et al., 2013] (11-летнее сглаживание).

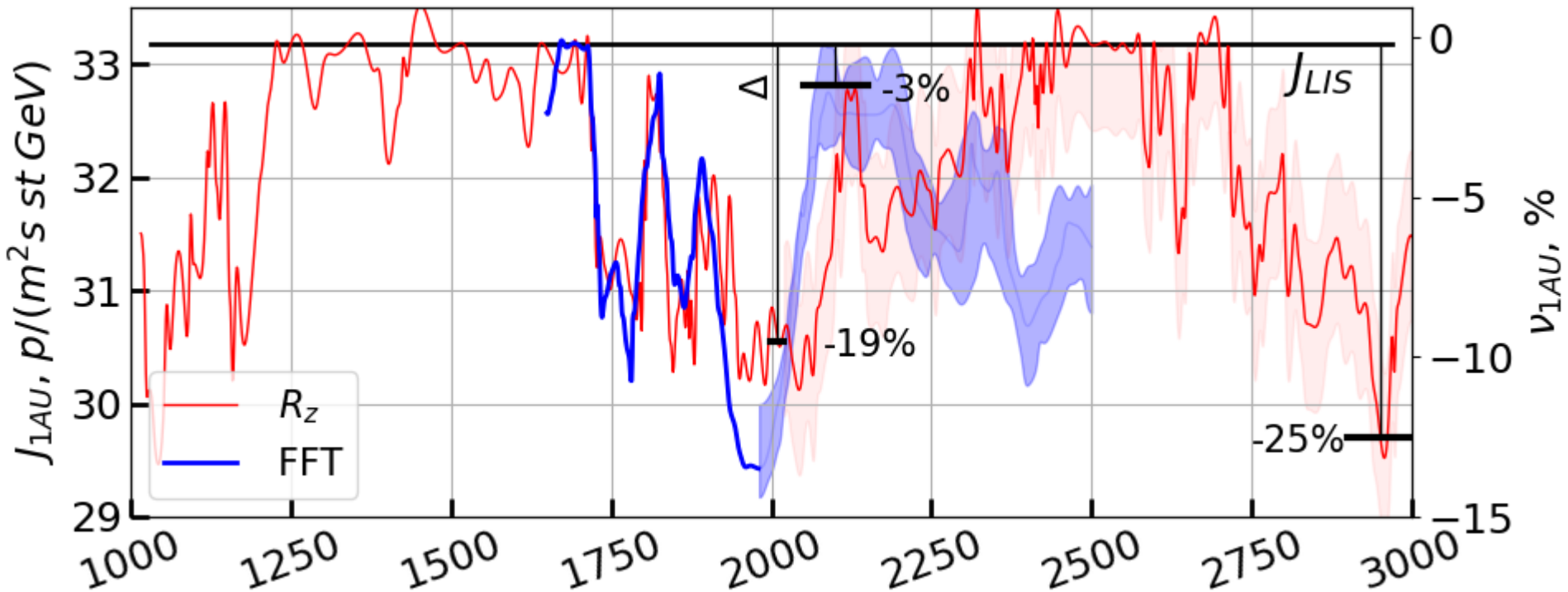
Прогноз интенсивности КЛ





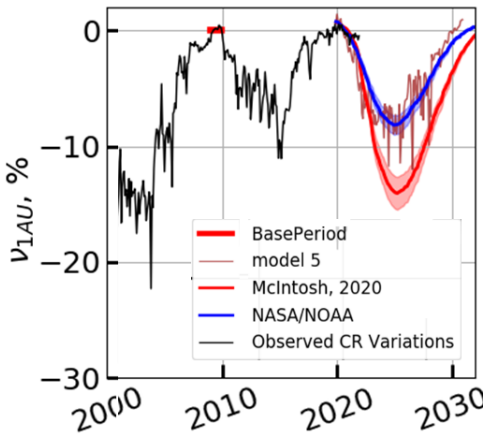
Прогноз интенсивности КЛ и их вариаций относительно LIS уровня для трех рассматриваемых моделей. Вертикальная линия – интенсивность 10 GV частиц на границе гелиосферы (LIS спектр).

Сравнение прогноза интенсивностей КЛ



Сравнение прогнозируемой интенсивности КЛ J_{1AU} и остаточной модуляции Δ.

Выводы

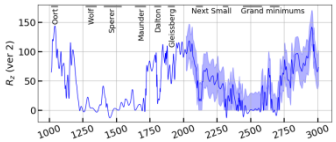


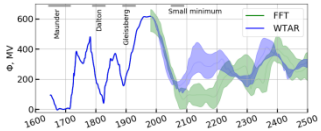
Долговременный масштаб (25-й солнечный цикл)

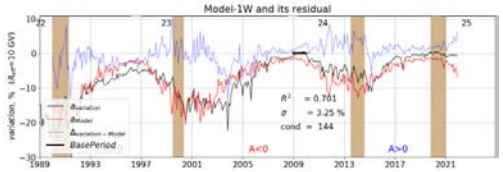
1) Наблюдается хорошее согласие сглаженных прогнозируемых вариаций КЛ в 25 цикле СА, полученных двумя независимыми методами.

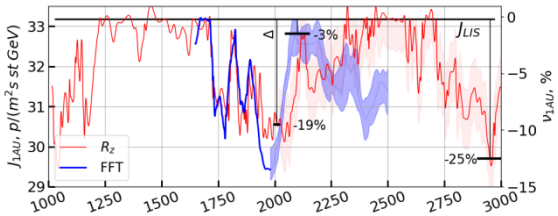
Первый метод - это прогноз, базирующийся на данных о числе солнечных пятен (NASA/NOAA) на основе однопараметрической модели вариаций. Второй прогноз выполнен на основе полной пяти параметрической модели вариаций; прогноз параметров солнечной активности в данной работе выполнен также двумя независимыми способами.

1) Ожидаемый 25-й цикл близок или незначительно более активный по сравнению с 24-й циклом СА.









Климатический масштаб (500 и 1000 лет)

1) Независимые климатические прогнозы до 3000 года по данным числа солнечных пятен [Rigozo et al., 2010] и до 2500 года по оценкам потенциала солнечной модуляции [Steinhilber et al., 2013] дают несколько экстремальных значений. Оба прогноза дают достаточно близкие минимумы СА около 2100 г. (сравнимый с минимумом Дальтона), но не совпадающие прогнозы для 2500 года: гигантский минимум СА в работе [Rigozo et al., 2010] и умеренный минимум СА по данным работы [Steinhilber et al., 2013], что приводит к максимальным или умеренным значениям потока КЛ .
2) Экспериментально найденная остаточная модуляция для 2009 года [Янке и др. 2023] равна Δ = 19±2%, а для ближайшего вероятного минимума солнечной активности (2100±50 лет) остаточная модуляция ожидается около 3%. Остаточная модуляция для прогнозируемого максимума вблизи 3000 года около 25%.

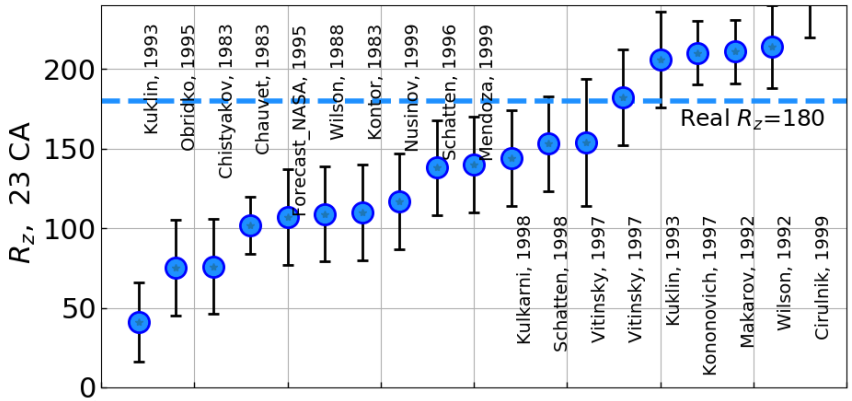
Спасибо за внимание
Прогнозируемое похолодание

Неожиданное похолодание! Новый Маундеровский период?
31 мая 2100. Москва, Троицк, Сиреневый бульвар.

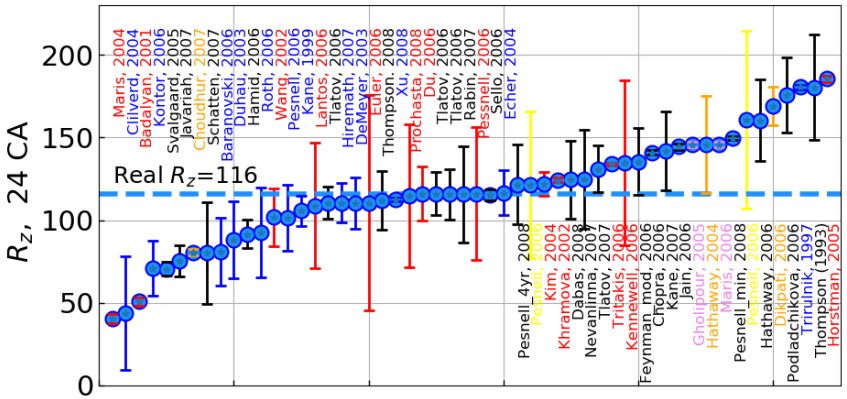
Спасибо за внимание

https://www.tidydata.ru/forecasting

Прогноз R_z для 23-25 цикла СА



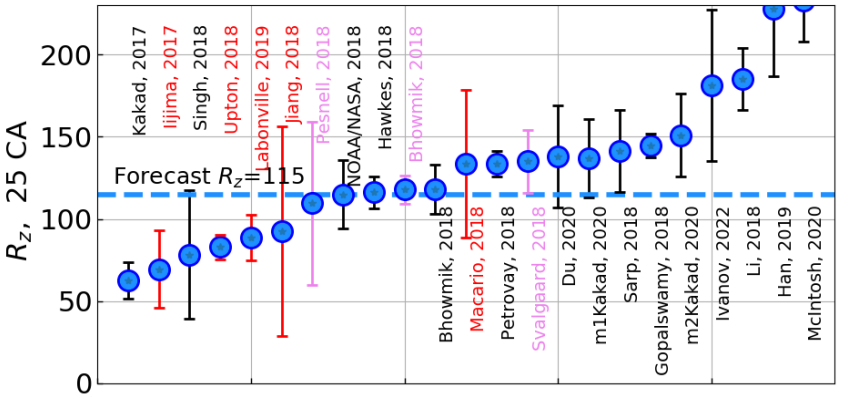
Разброс прогноза амплитуды 23-го солнечного цикла. Данные из архива [Храмова, 1997]. Горизонтальная линия – реальное значение максимума солнечного цикла.



Разброс прогноза амплитуды 24-го солнечного цикла. Данные из архива [Pesnell, 2005]. Горизонтальная линия – реальное значение.

Методы:

Climatological - Климатологический
Precursor - Предвестники
Dinamo model - Модель Динамо
Neural network - Нейронная сеть
Recent climatology - Современная климатология
Spectral - Спектральный



Разброс прогноза амплитуды 25-го солнечного цикла. Данные из архива [Labonville 2019]. Горизонтальная линия – прогнозируемое значение по данным **NOAA/NASA/ISES**

Прогноз .

Модель авторегрессии скользящего среднего - ARIMA(p,d,q)

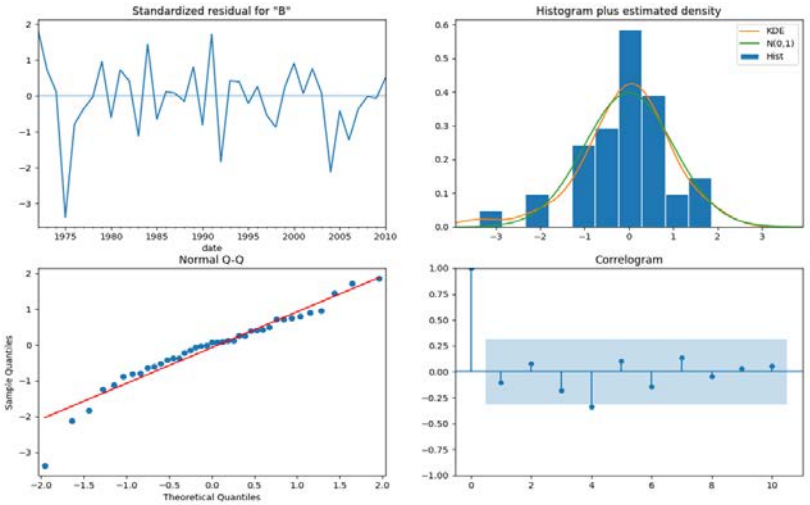
Модель предназначена для анализа стационарных временных рядов на основе оценки линейной зависимости прогнозируемых значений от исторических. AR – модель авторегрессии, I – интеграция, MA – модель скользящего среднего.

Модель предполагает, что временной ряд содержит три составляющие: авторегресионную, интегрированную и скользящее среднее, которые в модели обозначены p, d, q соответственно.

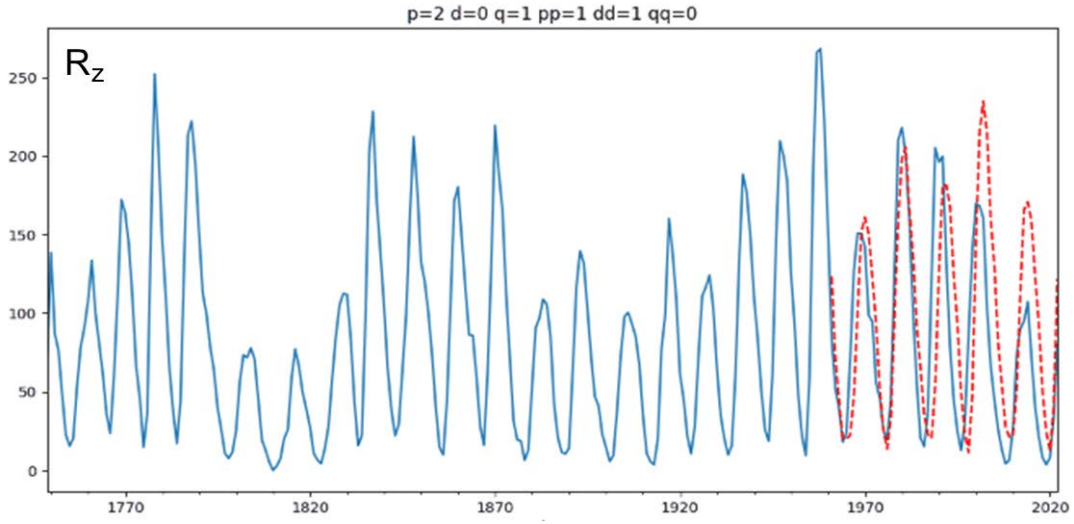
Величина p называется порядком авторегрессии. Она позволяет ответить на вопрос, будет ли очередной элемент ряда близок к значению X, если к нему были близки p предыдущих значений.

Величину d называют порядком интегрирования. Она показывает, насколько элемент ряда близок по значению к d предыдущим значениям, если разность между ними минимальна.

Параметр q — порядок скользящего среднего. Позволяет установить погрешность модели как линейную комбинацию наблюдавшихся ранее значений ошибок.

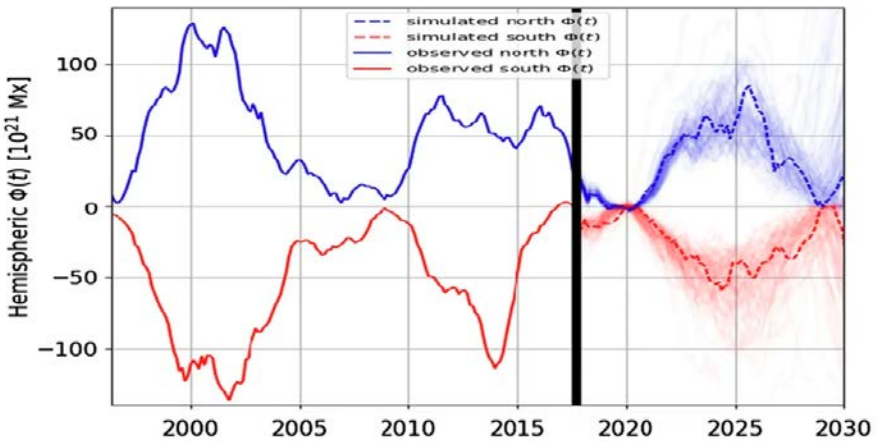


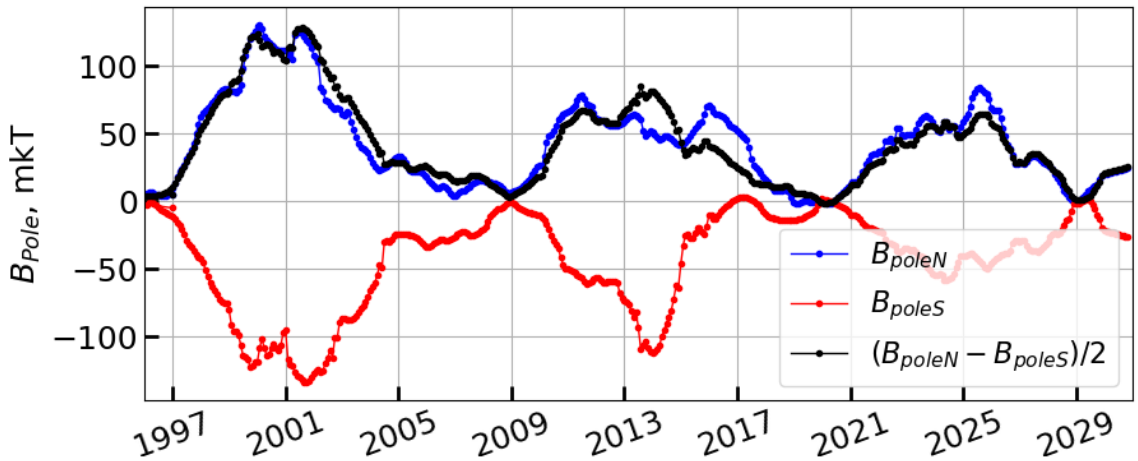
Проверка модели на адекватность.



Тестовые данные ARIMA для R_z. Синяя - реальные данные, красные – прогнозируемые.

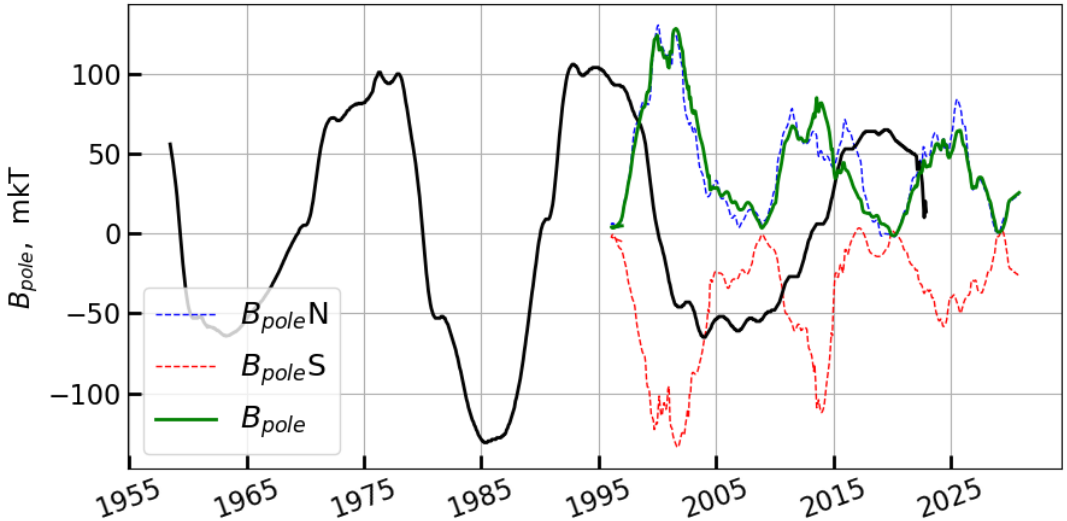
Прогноз 25 цикла СА ()

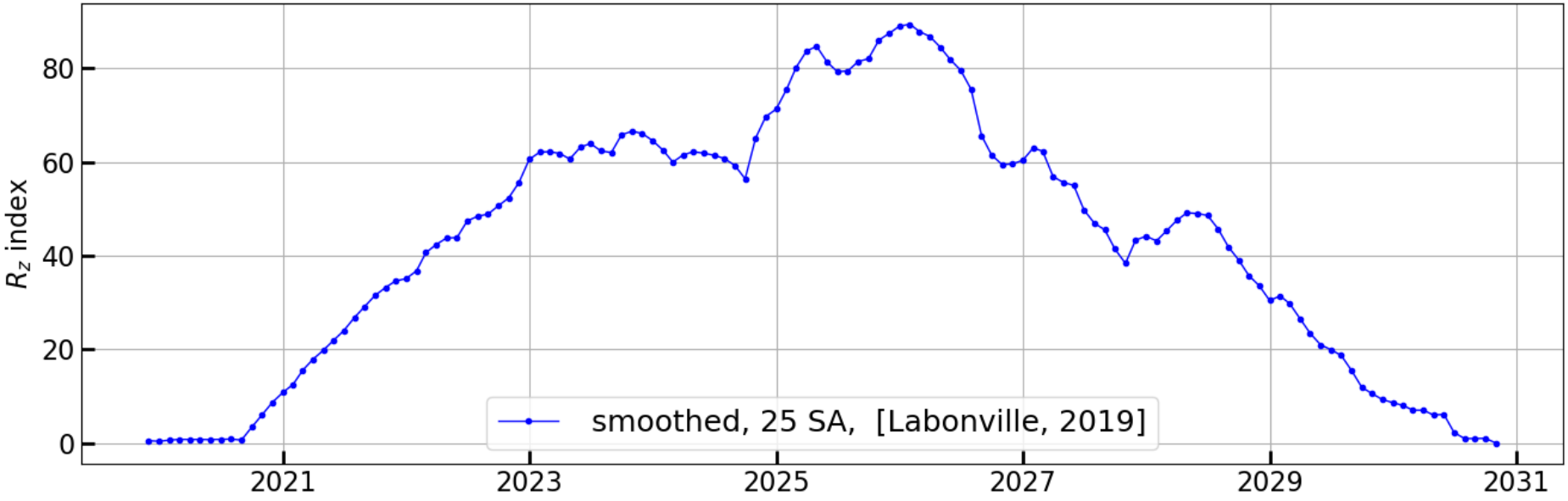




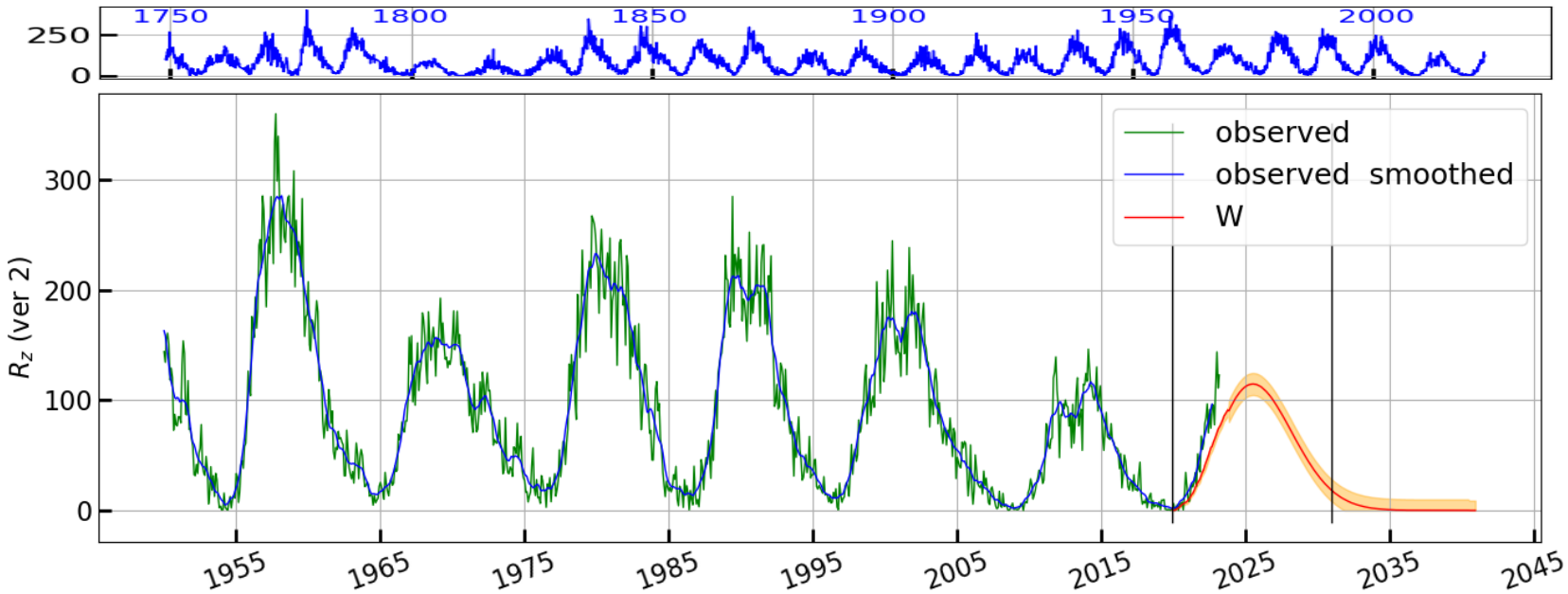
Полярное поле Солнца. 100 mkT=1G. ?=10^{21} Mx?

1 максвелл = 1 гаусс·см² = 10^{-8} вебер. В однородном магнитном поле с индукцией 1 гаусс магнитный поток в 1 максвелл проходит через плоский контур площадью 1 см², расположенный перпендикулярно вектору индукции. [Labonville et al., 2019]

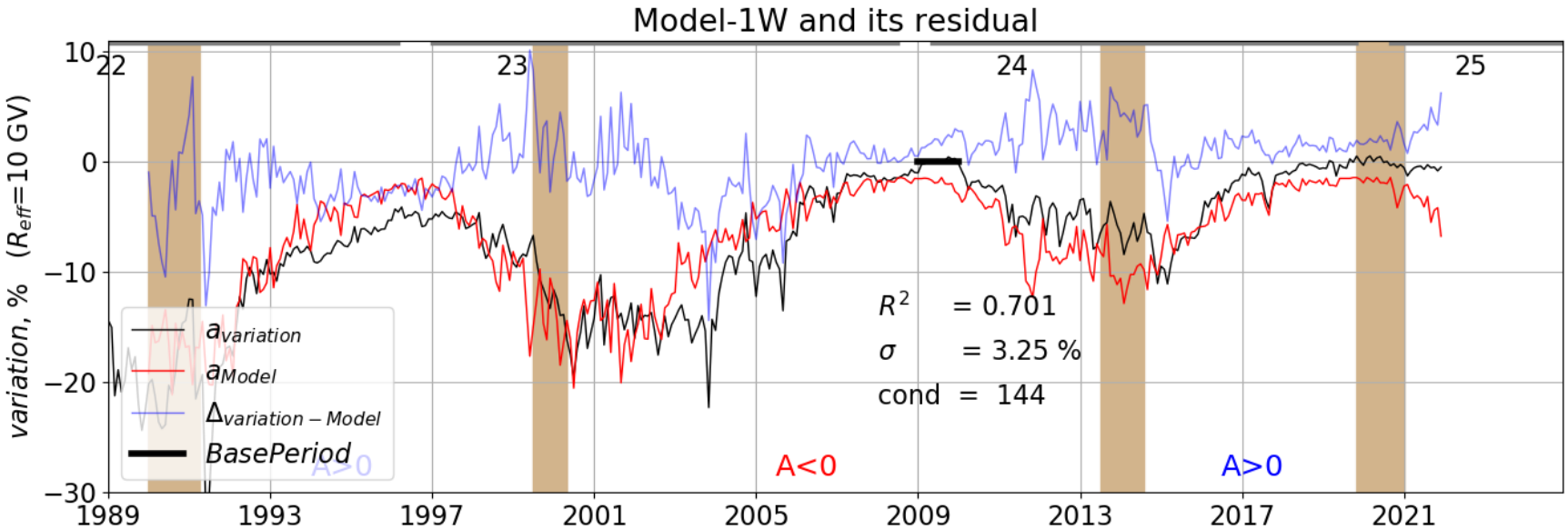




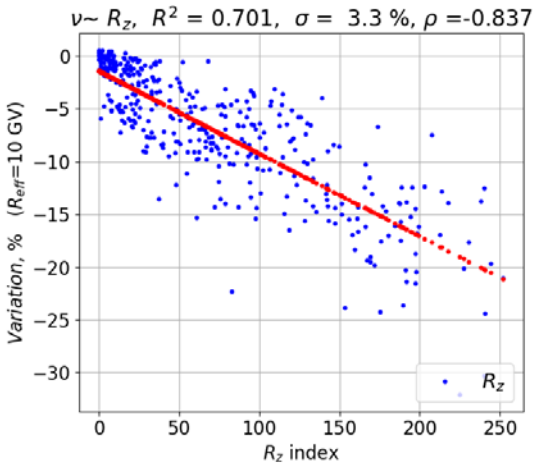
Прогноз чисел Вольфа для 25 цикла СА (11-летнее сглаживание) из работы [Labonville et al., 2019].


1750
1800
1850
1900
1950
2000
250
0
300
200
100
0
R_z (ver 2)
observed
observed smoothed
W
1955
1965
1975
1985
1995
2005
2015
2025
2035
2045

Простейшая модель вариаций $v=a_0+a_1 R_z$



Сравнение измеренных вариаций для частиц 10 GV и модели *вариаций* $\boxed{v_{model} = a_0 + a_1 R_z}$ и невязки $v - v_{model}$.



Уравнение регрессии

$v_{10} \pm \sigma$ = (-1.42±0.13) – (0.078±0.001) R_z [%]

Коэффициент детерминации R^2=0.7