

ВОСЕМНАДЦАТАЯ ЕЖЕГОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ»

6-10 февраля 2023 г

Секция «теория и наблюдение Солнца», доклад №5

И.П. Безродных, Е.И. Морозова, А.А. Петрукович

Связь структуры вариаций солнечных пятен (11-летние и QVO-вариации) с временной динамикой параметров динамического магнитного поля Солнца.

1. В статье исследуется связь динамики солнечной активности с временной динамикой параметров динамического магнитного поля Солнца. Проводится анализ динамики числа солнечных пятен для 8 циклов солнечной активности (17-24 циклы): 11-летних вариаций и вариаций, сконцентрированных в диапазоне $\sim 1.5-3.5$ года (так называемые квазидвухлетние вариации или QVO –вариации). Структура периодов вариаций для каждого цикла получена при использовании Фурье-преобразовании суточных величин числа солнечных пятен с применением последовательного клонирования данных. Возможной причиной динамики периодов вариаций в циклах может быть широтная динамика тахосферного магнитного поля (ТМП), которое возникает в сравнительно узкой области вблизи границы конвективной и лучистой зоны Солнца (в зоне «тахоклина»), где дифференциальная скорость вращения зоны конвекции сменяется на однородную скорость вращения лучистой зоны [1,2]. Широтная зависимость ТМП обычно задается формулой $B_Q = B_0 \cdot \cos q \cdot \sin q$ где Q – широта тороидального поля. B_0 – значение тороидального магнитного поля в области генерации. Величины тахосферного магнитного поля B_0 были вычислены в работе [3] при анализе структуры вариаций солнечных пятен для периодов $\sim 140-180$ суток и вариаций периодов быстрых гармоник магнитных волн Россби, возникающих в нижней части области конвекции, в зоне «тахоклина». Анализ показал, что вариации периодов SSN (диапазон 450-1400 суток) в циклах могут быть представлены в виде линейных функций широты и напряженности ТМП (рис.1), т.е. источник этого типа расположен в зоне «тахоклина».

2. Временная динамика числа солнечных пятен всегда рассматривается как основной показатель динамики солнечной активности. Следует отметить высокую степень корреляции между динамикой периодов вариаций и динамикой числа солнечных пятен.

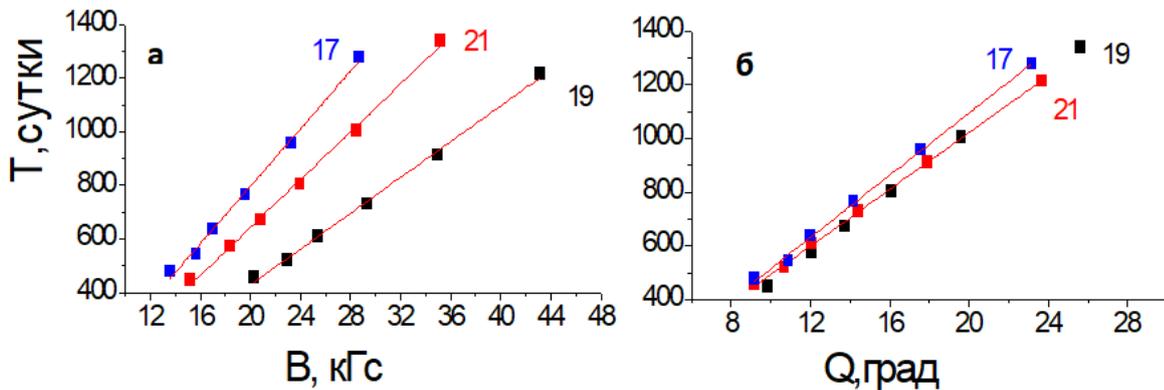


Рис.1 Зависимость периодов вариаций от динамики в цикле напряженности ТМП (а) и от динамики в цикле широты ТМП (б).

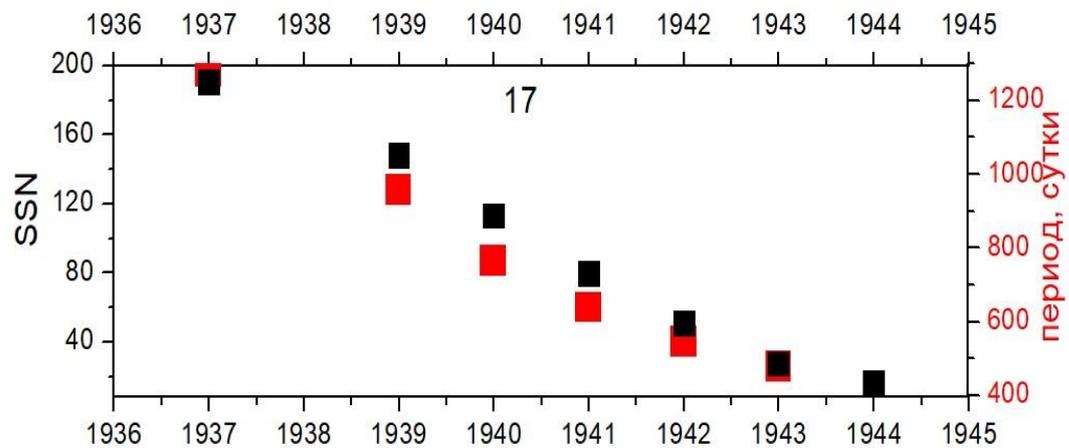


Рис. 2 Временная динамика SSN на фазе спада активности совмещена с результатами измерений периодов вариаций SSN в цикле.

На рис. 2 для 17 цикла временная динамика SSN на фазе спада активности совмещена с результатами измерений периодов вариаций SSN в цикле.

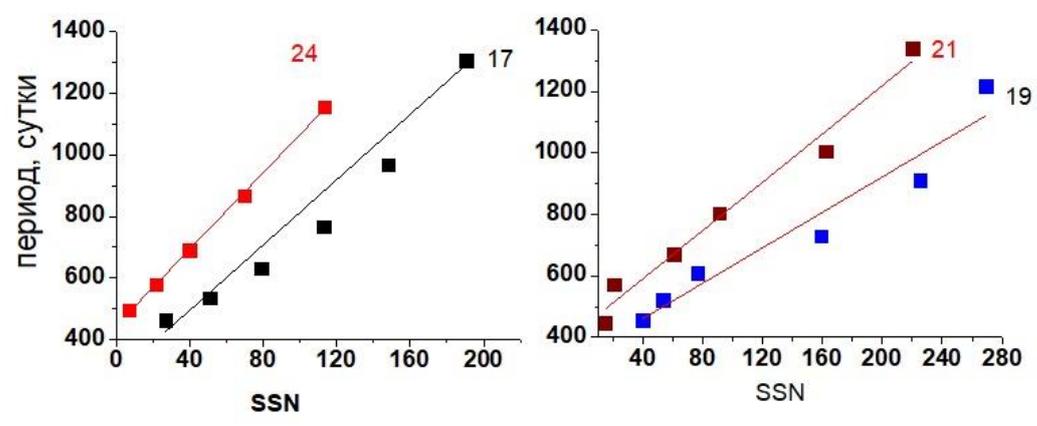


Рис.3 Зависимость периодов вариаций для 24 (красные значки), 17 (черные), 21 (коричневые) и 19 (синие) солнечных циклов от динамики SSN (фаза спада активности).

На рис.3 представлена зависимость периодов вариаций для 24 (красные значки), 17 (черные), 21 (коричневые) и 19 (синие) солнечных циклов от динамики SSN (фаза спада активности). Структура периодов фактически отражает временную структуру динамики SSN.

3. Временная динамика числа солнечных пятен фактически отражает временную динамику напряженности и широты ТМП. Следует отметить высокую степень корреляции между временной динамикой напряженности и широты ТМП и динамикой числа SSN. Для примера на рис. 4 временная динамика SSN на фазе спада активности совмещена для 21 цикла с динамикой напряженности ТМП (а) и для 17 цикла с динамикой широты ТМП (б).

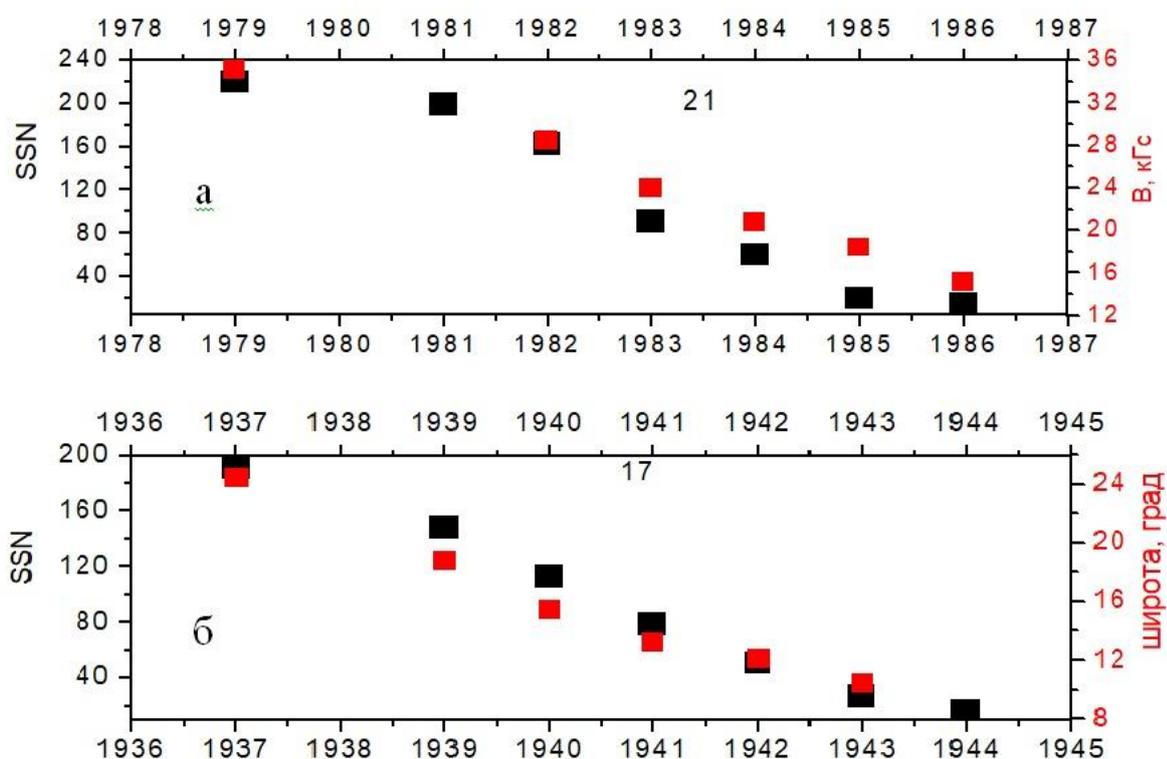


Рис.4 Временная динамика SSN на фазе спада активности совмещена для 21 цикла с динамикой напряженности ТМП (а) и для 17 цикла с динамикой широты ТМП (б).

Динамику SSN можно представить в виде линейных функций $SSN(B_{сп})$ и $SSN(Q_{сп})$. Градиенты функции $SSN(B_{сп})$ для всех циклов меняются в пределах $\pm 12\%$ от среднего значения (10.7 ssn/кГс), градиенты функции $SSN(Q_{сп})$ меняются в пределах $\sim 20-40\%$ от среднего значения (13,7 ssn/град). Сопоставляя временную динамику $SSN(t)$ с динамикой функции $SSN(B_{сп})$ и с динамикой функции $SSN(Q_{сп})$, получаем временную динамику напряженности и широты ТМП для фазы спада активности в виде

линейных функций $V_{\text{сп}}(t)$ и $Q_{\text{сп}}(t)$. Для фазы спада активности для 17, 18 и 19 циклов на рис.5(а) показана динамика широты ТМП, на рис. 5(б) показана динамика напряженности ТМП для 17, 18 и 19 циклов (фаза спада активности). Таким образом, в результате сравнительного анализа структуры периодов вариаций в цикле и временной динамики SSN для фазы спада активности были сделаны количественные оценки параметров ТМП (численные значения напряженности и широты, рис.5). Тахосферное магнитное поле можно рассматривать как широтную гармонику динамического магнитного поля Солнца (ДМП), которое возникает как результат перестройки структуры полярного (меридионального, внутреннего поля Солнца) и появления широтного тахосферного магнитного поля).

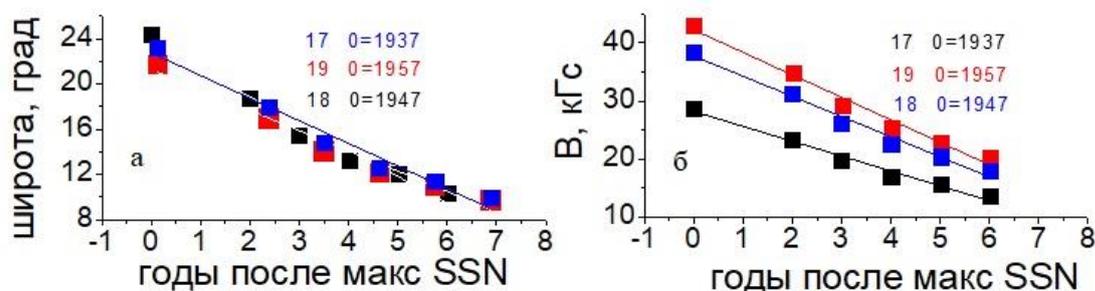


Рис.5 Динамика широты ТМП (а) и напряженности ТМП (б) для 17, 18 и 19 циклов (фаза спада активности).

Временную динамику магнитного поля для фазы роста активности $V_p(t)$ мы вычислили сопоставляя временную динамику SSN для фазы роста и $SSN(V_{\text{сп}})$. Градиенты функции $SSN(V_{\text{сп}})$ практически одинаковы для всех циклов (рис.5) , поэтому зависимость $SSN(V_{\text{сп}})$ справедлива и для фазы роста активности. Динамику широты ДМП для фазы роста активности $Q_p(t)$ рассчитана в предположении линейной зависимости между широтой ~ 35 град (начало цикла [2]) и широтой для максимума SSN в циклах. На рис. 6 представлена динамика напряженности ДМП в максимуме цикла и динамика максимального числа солнечных пятен для 17 – 24 солнечных циклов.

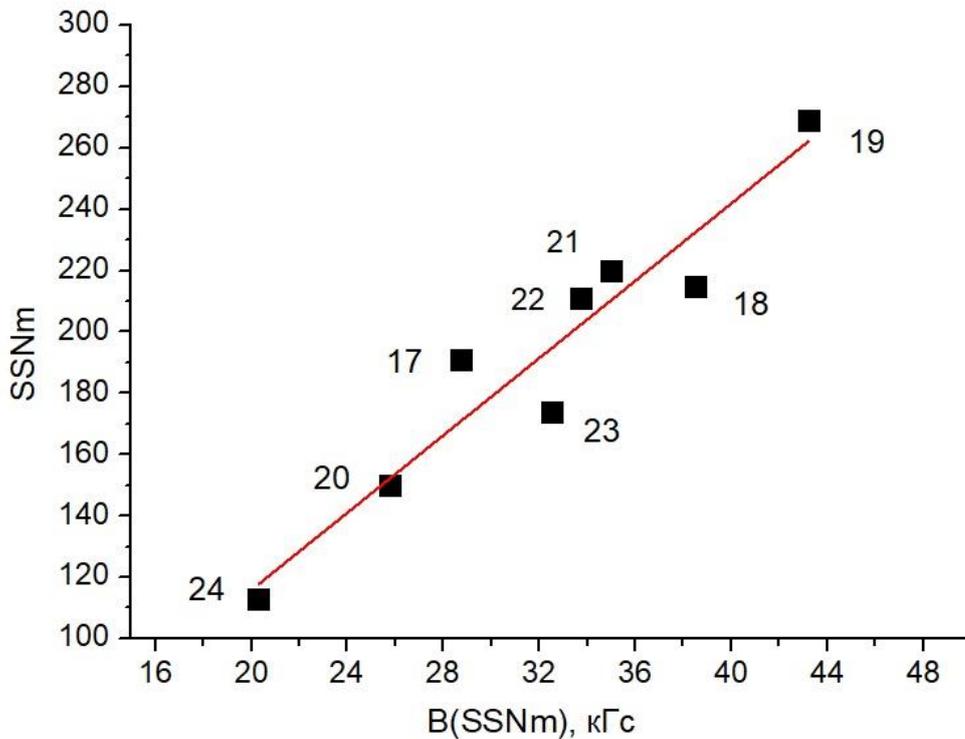


Рис. 6 Динамика напряженности ДМП в максимуме цикла и динамика максимального числа солнечных пятен для 17 – 24 солнечных циклов.

Среднее значение градиента линейной функции $Q_p(t)$ равно $\sim 3,6$ град/год, для 17 и 24 циклов градиент равен $\sim 2,6$ град/год. Среднее значение градиента линейной функции $B_p(t)$ для 18, 19, 21 и 22 циклов равно ~ 9 кГс/год, для 24 цикла градиент равен $\sim 1,5$ кГс/год. Следует отметить существенное отличие в динамике магнитного поля и широты на фазе роста и спада активности. На фазе роста активности в диапазоне широт ~ 35 - 23 град магнитное поле увеличивается, достигает максимума вблизи максимума SSN и далее уменьшается. Точка перегиба соответствует широте для максимума SSN (рис.6). Используя вычисленные временные вариации напряженности и широты динамического магнитного поля Солнца можно представить временную структуру SSN в циклах как временные вариации параметров динамического магнитного поля Солнца. Для примера на рис.7 представлена для 17 цикла временная динамика SSN и напряженности ДМП (а) и временная динамика SSN и широты ДМП (б).

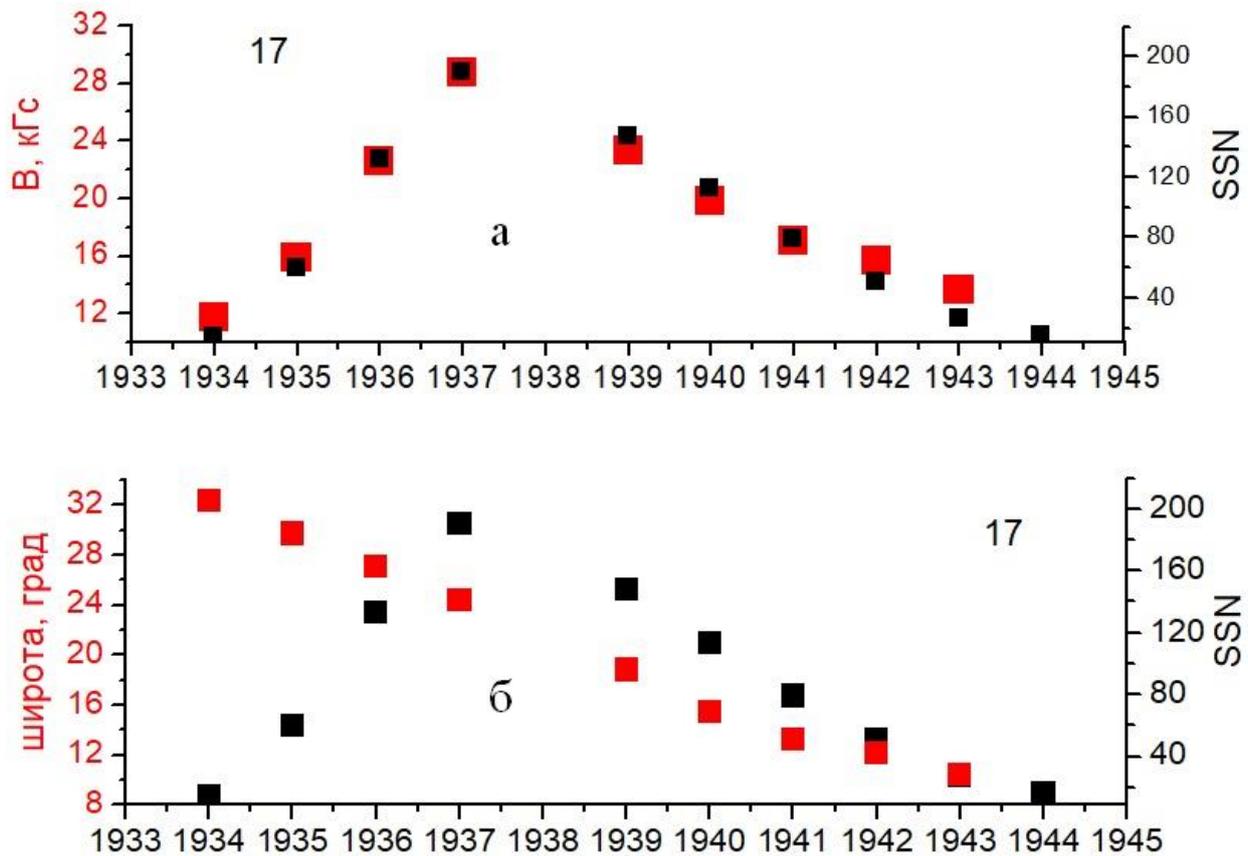


Рис.7 Временная динамика SSN и напряженности ДМП (а) и временная динамика SSN и широты ДМП (б).

4. Временная динамика числа солнечных пятен традиционно используется для описания динамики солнечной активности. Сравнительный анализ тонкой структуры периодов вариаций SSN (диапазон периодов $\sim 1,3 - 4$ года) и динамики широтной компоненты ДМП (тахосферного магнитного поля) показал возможность сделать количественные оценки временных вариаций SSN как вариаций динамического поля Солнца. На рис. 8 показаны вариации динамического магнитного поля Солнца и вариации числа солнечных пятен для 17-24 солнечных циклов. Можно выделить некоторые общие для всех циклов детали развития солнечной активности.

1. Градиенты функции $SSN(B)$ для всех циклов меняются в пределах $\pm 12\%$ от среднего значения $\sim 10,7$ ssn/кГс. На рис.9 для 17-24 солнечных циклов показана зависимость $SSN(B)$, которая аппроксимируется линейной функцией $SSN = -104.79 + 8.91B$ (кГс), коэффициент корреляции $\sim 93\%$. Эта функция определяет динамику $SSN(B)$ для отдельных циклов с точностью $\pm 25\%$. Возможно, существует единый механизм, формирующий динамику вариаций солнечных пятен и магнитного поля.

2. Скорость движения магнитных потоков к солнечной поверхности задается временной динамикой широты ДМП. На рис.10 для 17-24 циклов представлена временная динамика широты ДМП. Функции $Q_p(t)$ и $Q_{cp}(t)$ определяют скорость движения магнитных потоков к солнечной поверхности, задают периоду (длину) солнечных циклов. Для фазы спада активности широта изменяется со скоростью $\sim 2,3$ град/год, для 20 и 23 циклов со скоростью $\sim 1,6$ град/год. Для фазы роста активности широта изменяется со скоростью $\sim 3,6$ град/год и $\sim 2,6$ град/год (17 и 24 циклы). В процессе развития активности широта ДМП уменьшается, градиент линейной функции $Q(t)$ отрицательный.

Анализ динамики солнечных пятен для 8 солнечных циклов (17-24 циклы) показал, что вариации солнечной активности (11-летние вариации и вариации $\sim 1,3-4$ года) формируются в рамках развития единого динамомеханизма, определяющего временную динамику магнитного поля и широты ДМП.

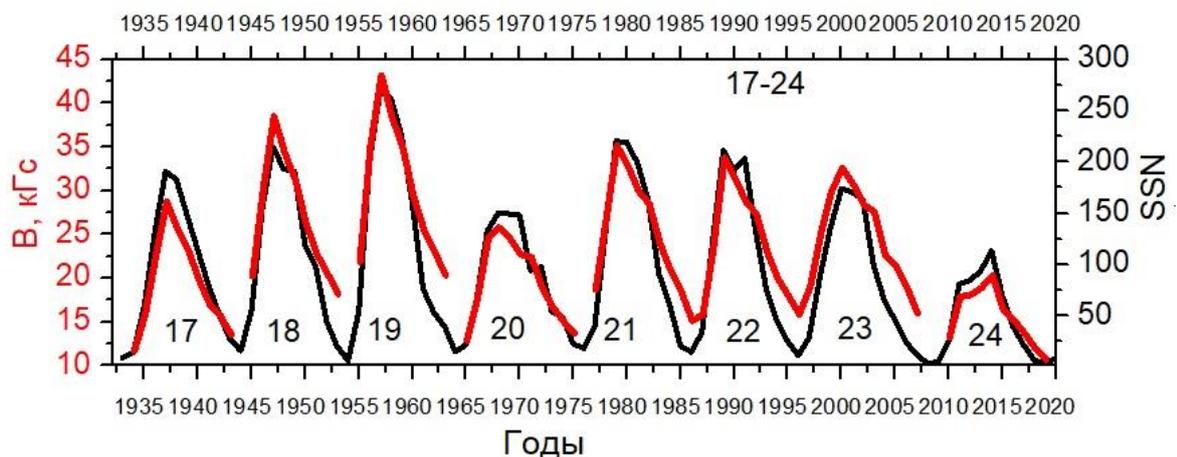


Рис.8 Вариации динамического магнитного поля Солнца и вариации числа солнечных пятен для 17-24 солнечных циклов.

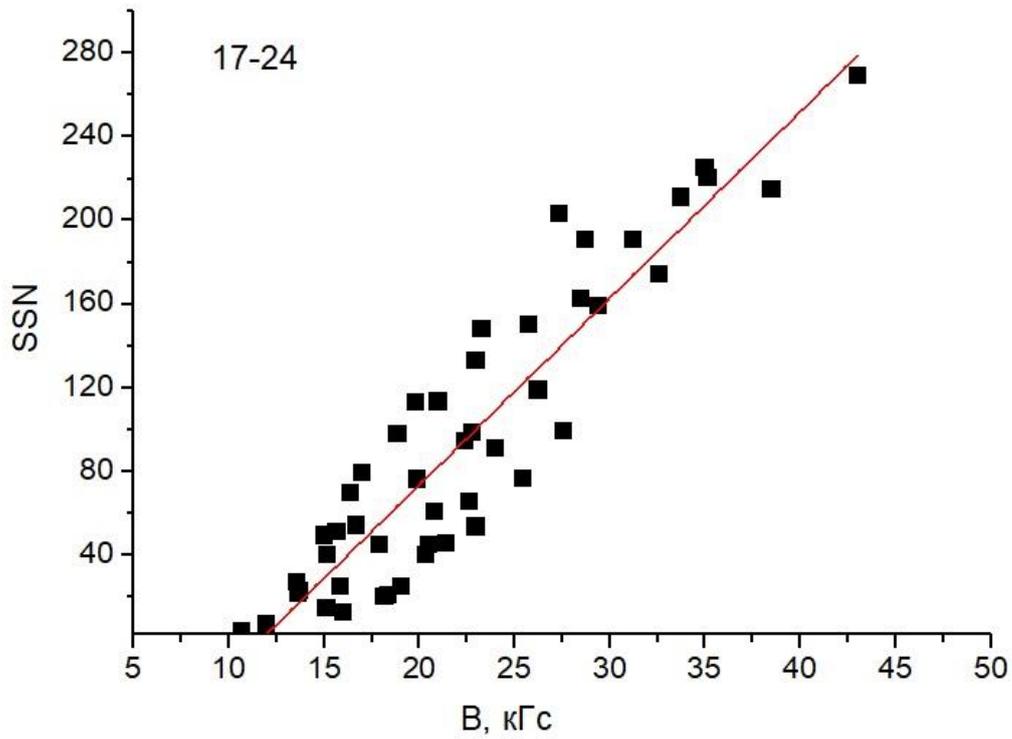
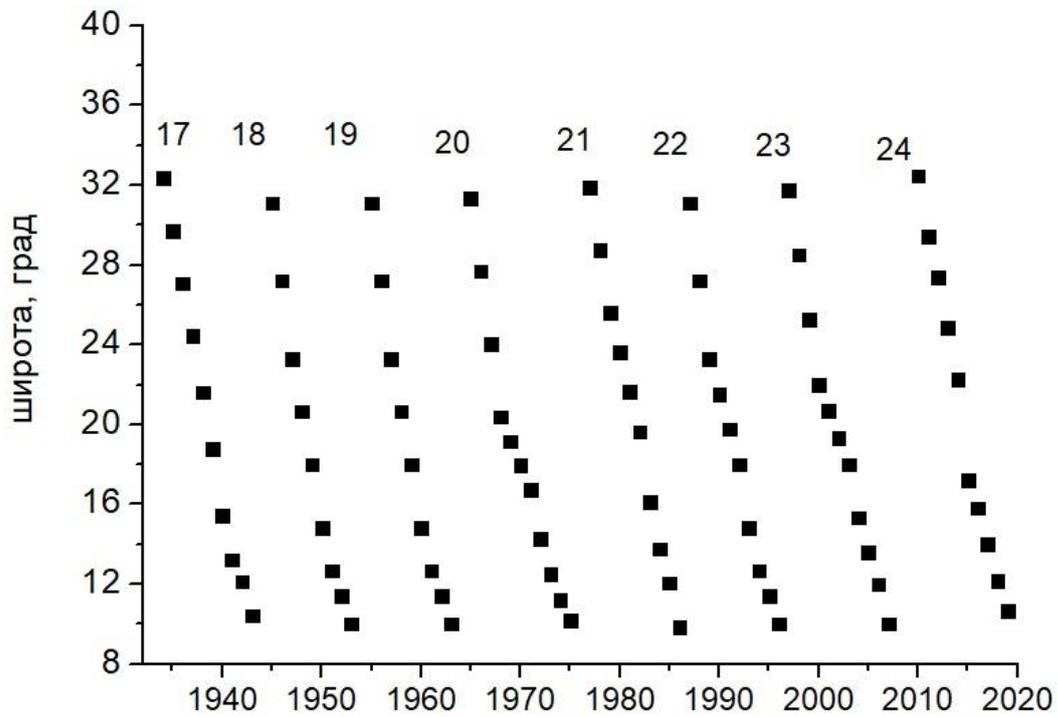


Рис.9 Зависимость числа солнечных пятен от напряженности динамического поля Солнца.



10. Временная динамика в циклах широты динамического магнитного поля Солнца

Литература

1. Dynamo models of the solar cycle/ Paul Charbonneau1// Living Reviews in Solar Physics (2020) 17:4, <https://doi.org/10.1007/s41116-020-00025-60123456789>
2. The Solar Cycle/David H. Hathaway//Living Rev. Solar Phys., 12, (2015), 4 DOI 10.1007/lrsp-2015-4
3. Тонкая структура периодических вариаций солнечных пятен (17 – 24-й циклы солнечной активности). 1. Динамика структуры вариаций солнечных пятен в 17 – 24-м циклах солнечной активности для периодов 120 – 220 дней. Вычисление динамического магнитного поля/И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович, М. В. Кожухов //”Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ”, М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ». -2021. Том. 182, №3, с.24-31. <https://jurnal.vniiem.ru/text/182/24-31.pdf>

<http://d54x.ru>
<http://d54x.ru/radiationbeltsrus.aspx>