

ДВАДЦАТЬ ПЕРВАЯ ЕЖЕГОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ "ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ" 9 - 13 ФЕВРАЛЯ 2026, ИКИ РАН СЕКЦИЯ «ТЕОРИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ СОЛНЦА», ДОКЛАД №1.1.3. СЕВЕРО-ЮЖНАЯ АСИММЕТРИЯ ПОЛЯРНОГО И ТОРОИДАЛЬНОГО МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ (21-24 СОЛНЕЧНЫЕ ЦИКЛЫ).

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

Северо-южная асимметрия солнечных пятен в динамике солнечных циклов является одной из нерешенных задач физики солнечной активности. В современных моделях формирование солнечного цикла рассматривают как циклический процесс изменения структуры крупномасштабного магнитного поля Солнца. Широтное дифференциальное вращение Солнца и меридиональная циркуляция магнитных потоков управляют циклическим процессом изменения структуры полярного и тороидального магнитных полей. В работе [1] подробно исследована связь динамики крупномасштабного магнитного поля Солнца с динамикой солнечной активности, проанализирована система корреляционных связей между динамикой в цикле числа солнечных пятен и динамикой скорости меридиональной циркуляции, параметрами тороидального и полярного магнитных полей. В предлагаемой работе исследуется динамика северо-южной асимметрии тороидального и полярного поля при развитии солнечной активности (21-24 солнечных циклы). Динамика полярного и тороидального поля напрямую связана с возникновением вблизи поверхности биполярных магнитных структур с сильным магнитным полем - солнечных пятен. Значительные отличия регистрируются в структуре магнитных потоков передних (leading) и задних (trailing) пятен. Магнитные потоки лидирующей полярности формируются с большим наклоном и ближе к экватору, чем магнитные потоки следующей полярности. Такая асимметрия магнитных потоков проявляется при формировании поверхностного тороидального магнитного поля. При воздействии дифференциального вращения на широтные магнитные поля возникающих магнитных структур на поверхности формируется асимметричный тороидальный магнитный поток. На поверхности Солнца тороидальный поток распространяется в меридиональном направлении к полюсу, формируя новое полярное (аксиальное) поле. Возникновение на поверхности северо-южной асимметрии тороидального поля можно рассматривать как первичный этап возникновения асимметрии солнечного цикла. В работе рассматривается северо-южная асимметрия тороидального и полярного магнитных полей для 21-24 солнечных циклов. Для анализа использованы данные **WSO (Wilcox Solar Observatory)**: годовые величины полярного поля (широтная область $\pm 50^\circ - \pm 90^\circ$) и поверхностного тороидального поля (широта $\pm 45^\circ$). Рассчитаны три типа северо-южной асимметрии NSA для полярного поля B_{pol} и тороидального поля B_{tor} . Используются следующие обозначения. Абсолютная NSA: $NSAB_{pol} = B_{poln} - B_{pols}$, $NSAB_{tor} = B_{torn} - B_{tors}$, кумулятивная NSA: $CNSAB_{pol} = CumB_{poln} - CumB_{pols}$, $CNSAB_{tor} = CumB_{torn} - CumB_{tors}$ и нормированная NSA: $nNSAB_{pol} = B_{poln} - B_{pols} / |B_{poln}| + |B_{pols}|$, $nNSAB_{tor} = B_{torn} - B_{tors} / |B_{torn}| + |B_{tors}|$. Результаты в графическом виде представлены на рис. 1-5. Рассмотрим связь динамики полярного B_{pol} и тороидального B_{tor} магнитных полей и динамики северо-южной асимметрии $NSAB_{pol}$ (рис.1) и $NSAB_{tor}$ (рис.2) с динамикой солнечных циклов. Минимум солнечного цикла. **B_{pol}** - максимум, $NSAB_{pol} > 0$, в среднем $\sim 0,05$ G. **B_{tor}** - минимум, в среднем ~ 4 G, $NSAB_{tor} < 0$, в среднем $\sim -0,25$ G.

Фаза возрастания активности. Между минимумом и максимумом цикла в течение $\sim 3-6$ лет полярное поле **B_{pol}** растет почти изотропно. В максимуме цикла B_{pol} меняет знак. На фазе роста активности **B_{torn}** растет, $NSAB_{tor} > 0$, в среднем ~ 1 G. Для всех циклов через $\sim 3-5$ суток после максимума на фазе спада активности NSA увеличивается и меняет знак. В полярном поле значительно растет **B_{pols}** , $NSAB_{pol} < 0$, в среднем $NSAB_{pol} \sim -0.3$ G. В тороидальном поле растет **B_{tors}** , $NSAB_{tor} < 0$, в среднем $NSAB_{tor} \sim -3$ G. Такое дополнительное увеличение на фазе спада активности полярного и тороидального магнитных полей происходит за счет диффузии через экватор потоков из другой полусферы.

Фаза спада активности. Кумулятивная динамика полярного поля $CumB_{pol}$, тороидального поля $CumB_{tor}$ и динамика кумулятивной асимметрии $CNSAB_{pol}$, $CNSAB_{tor}$ представлена на рис. 3 и 4.

Кумулятивная асимметрия дает общую картину взаимной динамики поля в обеих полушарах при развитии активности цикла. Для 21, 22 и 24 циклов общая динамика цикла, в основном, определяется динамикой V_{polS} , для 23 цикла динамикой V_{polN} (рис.3). Для 21-24 циклов динамика цикла на фазе роста активности определяется динамикой V_{torN} , на фазе спада динамикой V_{torS} . В работе рассмотрены корреляционные связи между динамикой NSA полярного и тороидального поля и динамикой в цикле числа солнечных пятен, а также взаимная корреляция $NSAB_{pol}$ и $NSAB_{tor}$. Для всех трех зависимостей коэффициенты корреляции близки к нулю. На рис.5 для 21-24 циклов представлена динамика нормированной асимметрии для V_{pol} (а) и V_{tor} (б). Следует отметить значительные вариации $nNSAB_{pol}$ и $nNSAB_{tor}$ при развитии активности в циклах. В среднем для всех циклов $nNSAB_{tor}$ слабо отрицательная, указывая на влияние поля южной полушеры, $nNSAB_{pol}$ колеблется вблизи нуля. Анализ показал независимость динамики нормированной асимметрии от динамики в цикле числа солнечных пятен (коэффициенты корреляции $< 0,1$).

В работе для полярного и тороидального магнитных полей проведен анализ динамики трех стандартных типов асимметрии, обычно используемых при исследовании асимметрии числа солнечных пятен [2- 6]. Роль северо-южной асимметрии в динамике солнечного цикла до настоящего времени остается открытым вопросом физики солнечной активности. Широтная зависимость дифференциального вращения и скорости меридиональной циркуляции определяют широтную динамику структуры крупномасштабного магнитного поля Солнца. Появление северо-южной асимметрии возможно на различных этапах формирования магнитного поля: в зоне тахосферы, при подъеме силовых трубок магнитных потоков в зоне конвекции, в приповерхностном слое при формировании широтного тороидального поля. Возникновение на поверхности асимметричного тороидального поля можно как начальный этап возникновения асимметрии солнечного цикла. Анализ показал, что дополнительное увеличение полярного и тороидального магнитных полей на фазе спада активности происходит за счет диффузии через экватор потоков из другой полушеры.

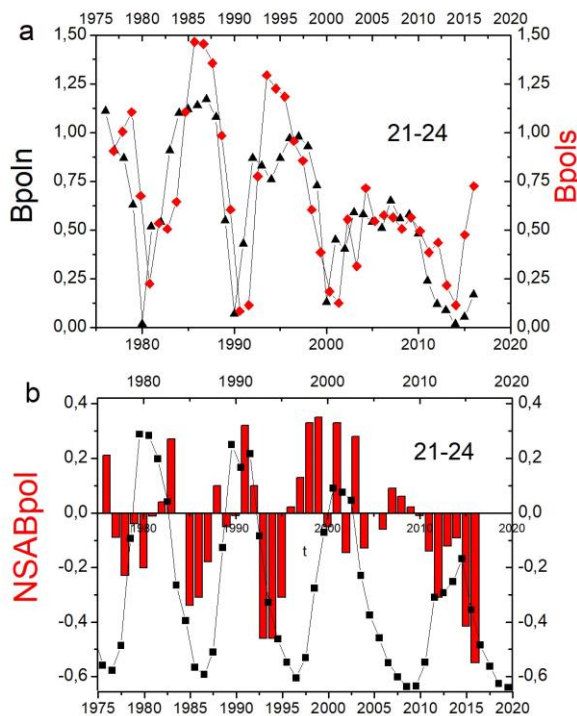


Рис.1 а- Динамика полярного поля в северной V_{polN} и южной полушарах V_{polS} (красные значки). Размерность гаусс, Г. б- Динамика северо-южной асимметрии полярного поля $NSAB_{pol}$, Г. Тонкие линии динамика числа солнечных пятен.

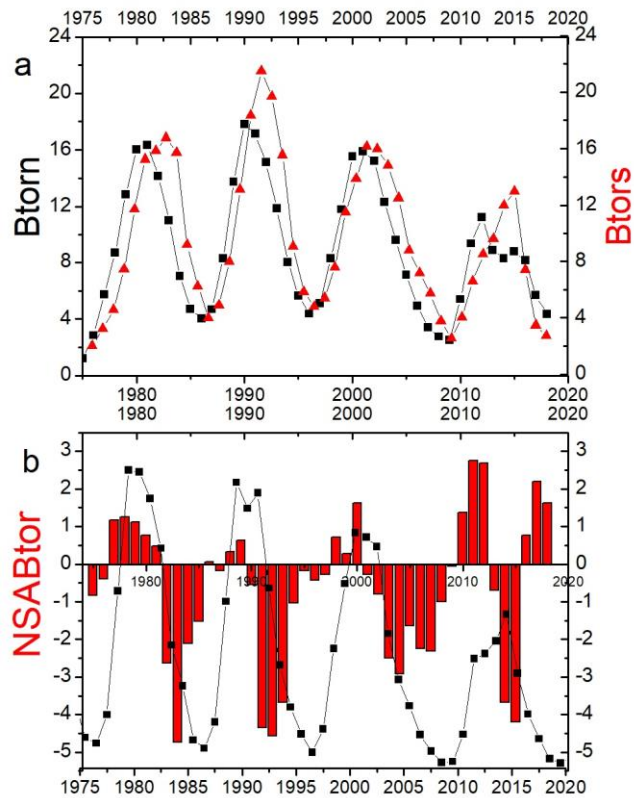


Рис. 2 а- Динамика тороидального поля в северной B_{torN} и южной полусферах B_{torS} (красные значки). Размерность гаусс, Г. б- Динамика северо-южной асимметрии тороидального поля $NSAB_{tor}$, Г..

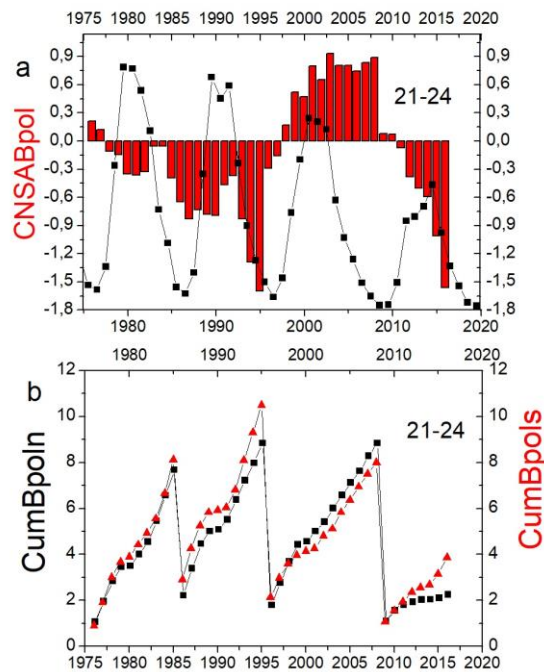


Рис.3 а- Динамика кумулятивной асимметрии полярного поля $CNSAB_{pol}$. б- кумулятивная динамика полярного поля в северной и южной полусферах, Г, $CumB_{polN}$, $CumB_{polS}$ (красные значки).

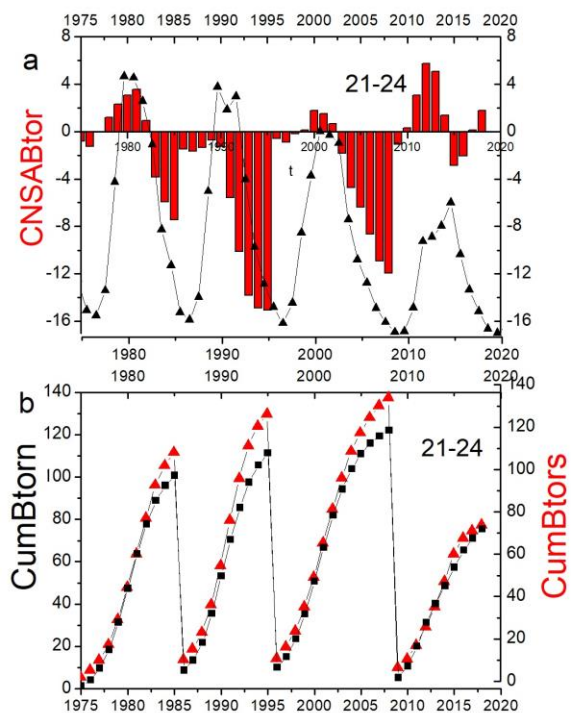


Рис.4 а- Динамика кумулятивной асимметрии тороидального поля CNSABtor. б- кумулятивная динамика тороидального поля в северной и южной полусферах, G, CumBtorn, CumBtors (красные значки).

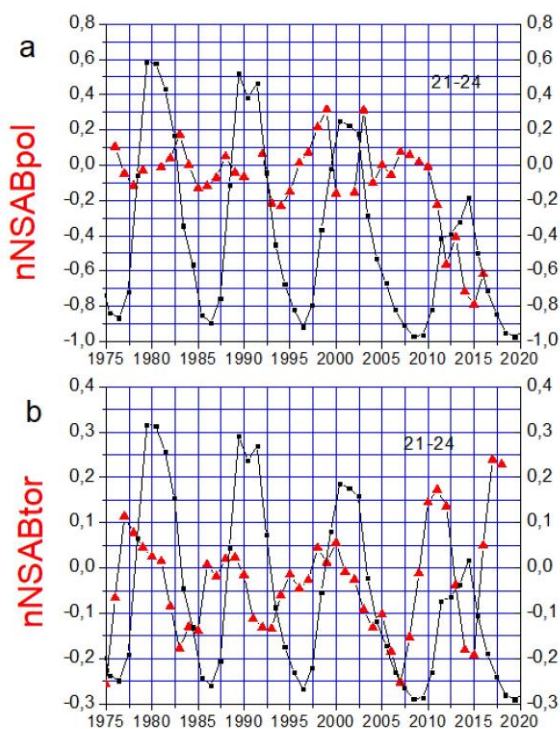


Рис.5 а- нормализованная северо-южная асимметрия полярного поля nNSABpol. б- нормализованная северо-южная асимметрия тороидального поля nNSABtor.

Литература.

1. Динамика солнечной активности, меридиональная циркуляция, структура полярного и тороидального магнитных полей в 21–24 –м солнечных циклах./Е. И. Морозова, А. А. Петрукович, И. П. Безродных, А. А. Мусалитин /Вопросы электромеханики. «Труды ВНИИЭМ» – Москва : АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2025 – Т. 206 , №3, с33-46. <https://jurnal.vniiem.ru/text/206/33-46.pdf>
2. Hemispheric Asymmetry of Relative Sunspot Numbers during Solar Cycles 17–25/W. Wang/The Astrophysical Journal Supplement Series, 280:20 (13pp), 2025 September, <https://doi.org/10.3847/1538-4365/adf105>
3. N-S Asymmetry and Periodicity of Solar Activity from Solar Cycles 21 – 24/S.F. Ibrahim1/Solar Physics (2025) 300:34, <https://doi.org/10.1007/s11207-025-02442-y>
4. Hemispheric sunspot numbers Rn and Rs from 1945–2004: catalogue and N-S asymmetry analysis for solar cycles 18–23/M. Temmer/A&A 447, 735–743 (2006), DOI: 10.1051/0004-6361:20054060
5. Solar Cycle Characteristics Examined in Separate Hemispheres: Phase, Gnevyshev Gap, and Length of Minimum/A.Norton/ Solar Physics, <http://arxiv.org/abs/1001.3186v1>
6. North–South Asymmetry in Solar Activity and Solar Cycle Prediction, IV: Prediction for Lengths of Upcoming Solar Cycles/J. Javaraiah/ Solar Physics, Volume 294, article number 64, iss. 5, 2019.

Морозова Евгения Ивановна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, т.(495)333-20-00, e-mail: morozova.evgeniya2014@yandex.ru. (ИКИ РАН).
Анатолий Алексеевич Петрукович, доктор физико-математических наук, академик РАН, директор ИКИ РАН, т.(495)333-32-67, e-mail: apetruko@iki.rssi.ru
Иннокентий Петрович Безродных, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, т.(495)333-20-00, e-mail: d54x@mail.ru (ИКИ РАН),

Морозова Евгения Ивановна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,
т.(495)333-20-00, (ИКИ РАН), e-mail: morozova.evgeniya2014@yandex.ru.

Анатолий Алексеевич Петрукович, доктор физико-математических наук, академик РАН, директор
ИКИ РАН, т.(495)333-32-67, e-mail: apetruko@iki.rssi.

Иннокентий Петрович Безродных, кандидат физико-математических наук, старший научный
сотрудник,
т.(495)333-20-00, e-mail: d54x@mail.ru (ИКИ РАН),