

УДК 612.014

АНАЛИЗ ФАЗ КВАЗИДВУХЛЕТНИХ ВАРИАЦИЙ ПОТОКОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ

© 2022 г. В. П. Охлопков*

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобелыцина Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: ovpetrovich@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.01.2022 г.

После доработки 11.04.2022 г.

Принята к публикации 04.05.2022 г.

Исследованы фазы квазидвухлетних вариаций (КДВ) в потоках космических лучей, параметрах солнечной активности и межпланетной среды. Проведен спектральный анализ КДВ перечисленных данных. Для используемых данных выявлены спектральные составляющие с максимальной амплитудой (синусоидальная составляющая с периодом около 1.7 года (около 20.5 месяцев)). Проведено сравнение фаз КДВ с фазами этих синусоид в те временные интервалы, где КДВ однозначно выявлены достоверно. Показано, что по всем данным фазы квазидвухлетних вариаций сохраняются в течение многих десятилетий с незначительными отклонениями. Это свидетельствует о долготной стабильности областей на Солнце, ответственных за квазидвухлетнюю вариацию.

DOI: 10.31857/S0023420622050053

1. ВВЕДЕНИЕ

Квазидвухлетние вариации различных проявлений солнечной активности (СА), параметров межпланетной среды и галактических космических лучей (ГКЛ) изучались на протяжении многих десятилетий [1, 2]. Это исследование является продолжением работ [1, 2], и здесь фазы квазидвухлетних вариаций (КДВ) анализируются за период 5 циклов солнечной активности. Квазидвухлетние вариации выделяются математическим избирательным фильтром, описанным в [1, 2]. Интерес к поведению фаз во времени связан с тем, что в работе [3] было проведено исследование квазипериодичностей в 5 циклах СА как в потоках КЛ, так и в параметрах солнечной активности и межпланетной среды. Были выявлены устойчивые сдвиги спектральных линий в сочетаниях четный-нечетный циклов СА (20–21 и 22–23). Квазидвухлетняя периодичность в четных и нечетных циклах различается по длительности примерно на 2 месяца. Это интерпретировалось как проявление 22-летнего цикла в длительности периодичностей, особенно ярко выраженной в квазидвухлетней вариации.

Поскольку в данной работе делается вывод о долготной стабильности областей на Солнце, ответственных за квазидвухлетнюю вариацию, то рассмотрим современные представления в этом направлении.

В работе [4] проведен анализ данных групп солнечных пятен за последние 120 лет и показано,

что солнечные пятна как в северном, так и в южном полушариях образуются предпочтительно на двух постоянных активных долготах, разделенных на 180° . При этом в системе отсчета Кэррингтона активные долготы непрерывно мигрируют по фазе относительно меридиана Кэррингтона с переменной скоростью. Тем не менее, они остаются квазижесткой структурой. Авторы считают, что миграция активных долгот определяется изменениями средней широты солнечных пятен и дифференциального вращения. Две активные долготы периодически чередуются.

В работе [5] по данным о солнечных пятнах Гринвичской обсерватории за 1879–2003 гг. (12–23-й циклы) выделены четыре активные долготы, соответствующие в среднем кэррингтоновским долготам $\sim 0^\circ$, $\sim 90^\circ$, $\sim 180^\circ$, $\sim 270^\circ$. В течение всего времени жизни зоны интенсивного пятнообразования вращаются как твердотельные образования, что свидетельствует о том, что их источник лежит в основании конвективной зоны. При этом, как правило, одновременно наблюдается лишь пара антиподальных активных долгот, отстоящих друг от друга на $\sim 180^\circ$ (на гелиодолготах $\sim 90^\circ$ и $\sim 270^\circ$ или $\sim 180^\circ$ и $\sim 0^\circ$), хотя в течение некоторого времени могут одновременно существовать и 3 или очень редко даже все четыре активные долготы. В каждом из четырех секторов активных долгот выявлены квазидвухлетние вариации со средними периодами ~ 30 оборотов (~ 2.4 года), из-

меняющимися во времени в интервале от 20 до 40 оборотов (от ~1.5 до 3 лет).

В работе [6] было изучено долготное распределение наиболее активных зон пятен на фотосфере по данным о солнечных пятнах за 12 солнечных циклов (циклы 12–23) отдельно для северного и южного полушарий и всей солнечной сферы. При анализе долготновременных гистограмм было выявлено шесть активных долгот ($>0^\circ$, $\sim 90^\circ$, $\sim 135^\circ$, $\sim 180^\circ$, $\sim 270^\circ$ и $<360^\circ$), из которых три ($\sim 90^\circ$, $\sim 180^\circ$ и $\sim 270^\circ$) наблюдаются наиболее часто для всего проанализированного набора данных. Время жизни и долготный разброс активных долгот пятен составляют 3–5 оборотов Кэррингтона и 20° – 30° долготы Кэррингтона соответственно. Обнаружено, что активные долготы солнечных пятен следуют определенной долготной схеме в течение эволюции 11-летнего солнечного цикла. В начале солнечного цикла они появляются в основном вокруг двух долгот ~ 0 градусов и $\sim 270^\circ$ в широтном поясе 30° – 40° , но в солнечном цикле они имеют тенденцию быть устойчивыми вокруг двух долгот $\sim 90^\circ$ и $\sim 270^\circ$, которые являются антиподальными.

В работе [7] рассмотрен вопрос о существовании на Солнце “активных долгот” и их связи с крупномасштабным полем Солнца и фоновыми полями. Были исследованы наблюдения площадей активных областей пятен по Гринвичским наблюдениям с 1874 г., крупномасштабных магнитных полей с 1976 г. и фоновых полей с 1996 г. Авторы показали существование активных долгот, вращающихся с кэррингтоновским периодом и существующих 15–20 оборотов. При этом активные долготы для групп с большими площадями выражены гораздо более четко. Показано, что глобальный солнечный диполь вращается со скоростью несколько более быстрой, чем кэррингтоновская система (средний оборот 27.1621 дня, то есть на 0.1132 дня меньше, чем кэррингтоновский период). Показано, что фоновое магнитное поле меняется с долготой. Долготные изменения слабого и сильного магнитного поля коррелируют, при этом “долготная картинка” не сохраняется во времени.

В работах [8–10] был проведен обширный объем исследований по проблеме активных долгот. С использованием Гринвичских данных о ежедневных значениях площадей солнечных пятен за 1879–2004 гг. (12–23 циклы) был введен новый индекс солнечной активности S_{CR} , который рассчитывался для каждой группы солнечных пятен суммированием ежедневных значений их площадей за кэррингтоновский оборот. Кэррингтоновская долгота каждой группы пятен в данном обороте фиксировалась для того дня, когда ее площадь была наибольшей. Выявлены активные долготы как в северном, так и южном полушари-

ях Солнца и показано, что зоны активных долгот состоят из набора отдельных зон формирования пятен. При этом установлено, что наиболее мощные и долгоживущие проявления активности довольно устойчивы и вращаются жестко с кэррингтоновским периодом $T = 27.3$ дней. Ширина зон пятнообразования по гелиодолготе составляет $\sim 20^\circ$ – 30° и в течение всего времени жизни меняется незначительно. В зонах активных долгот изучались квазидвухлетние вариации с помощью спектрально-временного анализа последовательностей S_{CR} , рассчитанных для каждого из секторов активных долгот северной и южной полусферы. Автор показал, что квазидвухлетние вариации S_{CR} представляют собой на самом деле набор из нескольких вариаций с дискретными периодами в диапазоне от 8 до 38 оборотов (0.6–0.9, 1.05–1.35, 1.5–2.0, 2.1–2.6 лет). Несмотря на неустойчивость локализации зон активных долгот на таком большом интервале времени, хорошо заметна 4-х зональная структура в распределении S_{CR} по гелиодолготе, соответствующая 4-м интервалам гелиодолгот: 60° – 140° , 140° – 240° , 240° – 340° и интервале от 340° одного оборота до 60° следующего.

В этой статье был использован обширный материал за 1958–2020 гг.: среднемесячные значения интенсивности ГКЛ в стратосфере (Мурманск, на рис. 1 обозначен как МУР, остаточное давление 50 г см⁻², данные Долгопрудненской научной станции Физического института Российской академии наук (ФИАН)) [11]; данные о нейтронной компоненте (Москва, на рис. 1 как МОСНМ) ([http://www.wdcb.ru/stp/data/cosmic.ray/Neutron-Monitors\(monthly_values\)](http://www.wdcb.ru/stp/data/cosmic.ray/Neutron-Monitors(monthly_values))); интенсивность среднего магнитного поля Солнца как звезды (модуль, [СМП], 1969–2020) и углы наклона гелиосферного токового слоя (ψ) (<http://wso.stanford.edu>); интенсивность межпланетного магнитного поля (ММП, [Н], 1965–2020); геомагнитная активность (Аp-индекс) (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>).

2. АНАЛИЗ ДАННЫХ

Анализ проводился следующим образом. Квазидвухлетние вариации, полученные после фильтрации (на рис. 2–7 являются средними панелями), обрабатывались спектральным анализом для определения наибольшей спектральной составляющей по амплитуде. На рис. 1 показаны эти спектры. Эти спектры представляют собой сложный набор спектральных компонент.

На рис. 2–7 показаны КДВ различных используемых данных и спектральная составляющая для них с максимальной амплитудой (квазидвухлетний период около 1.7 года (20.5 месяцев), расположена под графиком соответствующей КДВ, на рис. 2–7 нижняя панель). Эта спектральная со-

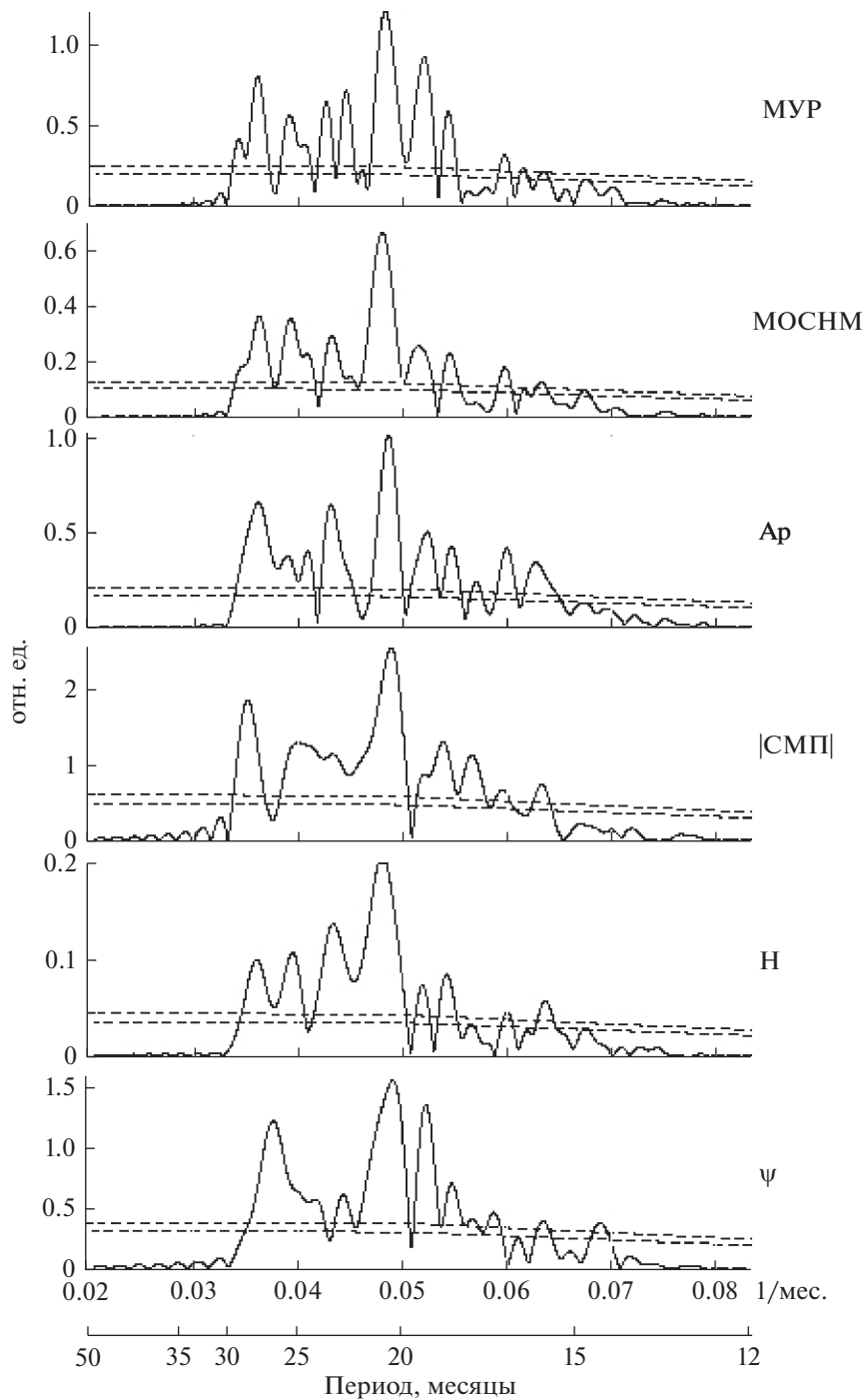


Рис. 1. Частотные спектры квазидвухлетних волн. Пунктир – уровни 95 и 99% значимости.

ставляющая (синусоида) далее рассматривалась как базовая. Относительно этой основной синусоиды были рассчитаны фазовые сдвиги максимумов амплитуд квазидвухлетних вариаций.

Необходимо сравнивать фазы этих синусоид с фазами параметров КДВ на тех временных интервалах, где амплитуды КДВ превышают 1/4 макси-

мальной амплитуды, т.е., где КДВ однозначно идентифицируется надежно. Фазовые сдвиги показаны в табл. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из таблицы видно, что для всех используемых данных фазы квазидвухлетних вариаций сохраня-

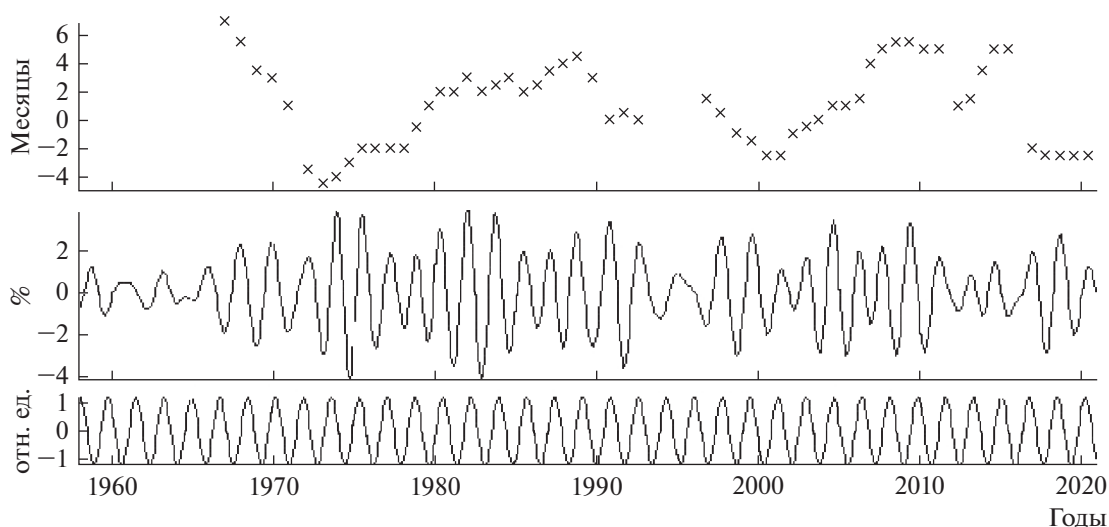


Рис. 2. Для данных по потокам космических лучей в стратосфере (Мурманск). Средняя панель – квазидвухлетняя вариация, выделенная математическим избирательным фильтром. Нижняя панель – спектральная составляющая с максимальной амплитудой из спектра этой вариации (1.7 года, базовая синусоида). Верхняя панель – фазовые сдвиги между КДВ и базовой синусоидой (положительные значения – КДВ опережает, отрицательные – отстает).

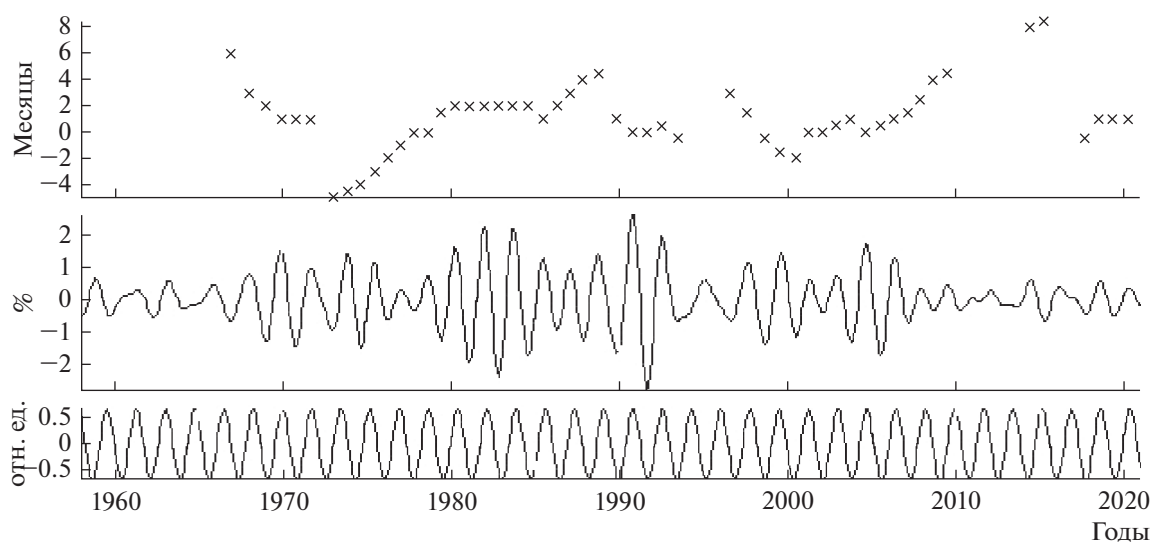


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но для данных о нейтронной компоненте космических лучей в Москве.

Таблица 1. Фазовые сдвиги между квазидвухлетними волнами и базовой спектральной составляющей (месяцы) для различных данных

| Используемые данные | Среднее значение сдвига | Среднеквадратичная ошибка среднего | Среднеквадратичная ошибка |
|------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| ГКЛ, стратосфера, Мурманск (МУР) | 2.61 | 0.41 | 3.11 |
| Нейтронный монитор, Москва (МОСНМ) | 2.03 | 0.39 | 2.81 |
| Ар | 2.19 | 0.41 | 2.82 |
| [СМП] | 1.80 | 0.38 | 2.39 |
| Н | 2.52 | 0.51 | 3.20 |
| Ψ | 2.45 | 0.47 | 3.00 |

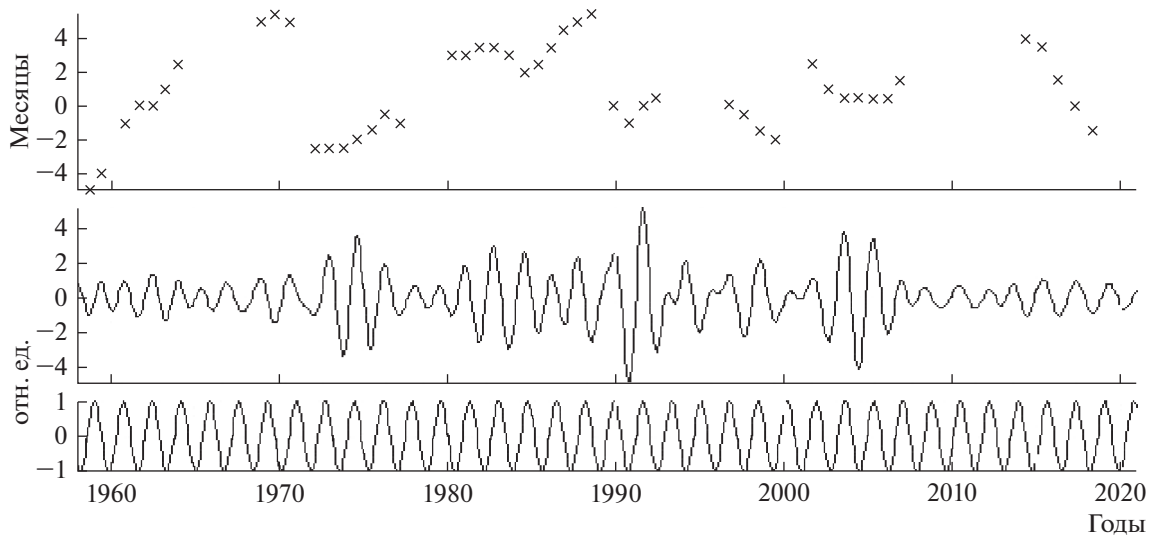


Рис. 4. То же, что и на рис. 2, но для данных об Ар-индексе.

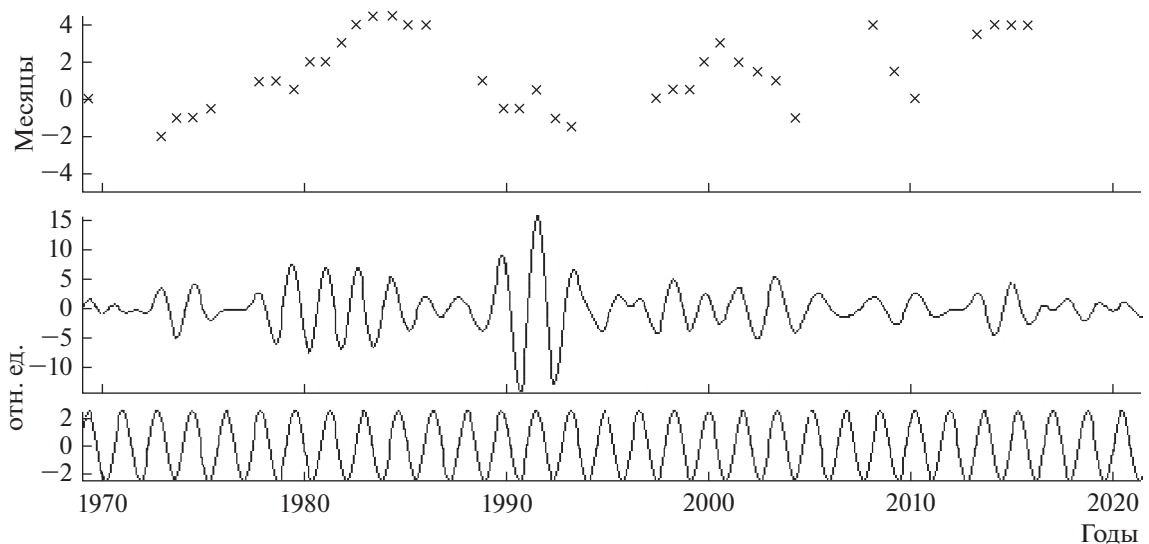


Рис. 5. Как и на рис. 2, но для данных о среднем магнитном поле Солнца.

ются в течение многих десятилетий с незначительными отклонениями. Это указывает на долготную устойчивость областей Солнца, ответственных за квазидвухлетнюю вариацию.

Наше исследование квазипериодичностей [3] в потоках КЛ за пять циклов СА, а также в параметрах солнечной активности и межпланетной среды позволило выделить устойчивые сдвиги спектральных линий в частотных спектрах (в частности, для квазидвухлетних вариаций) в четно-нечетных комбинациях циклов СА (20–21 и 22–23). Несомненно, этот эффект отражается в фазовых сдвигах квазидвухлетних вариаций.

В работах [1–3] показана хорошая связь КДВ КЛ со средним магнитным полем Солнца (в работах [12–15] СМП называют общим магнитным полем Солнца). В СМП, как видно из рис. 5, хорошо проявляется КДВ. Хорошо известно, что СМП определяется крупномасштабными полями (КМП) Солнца. Как показано в работах [12–15] основной вклад в СМП вносят КМП. Вклад активных областей с сильными полями незначителен из-за малой площади по сравнению с невозмущенными областями.

Крупномасштабные поля и секторная структура солнечных магнитных полей определяют структуру и динамику активных долгот [8, 9]. Ак-

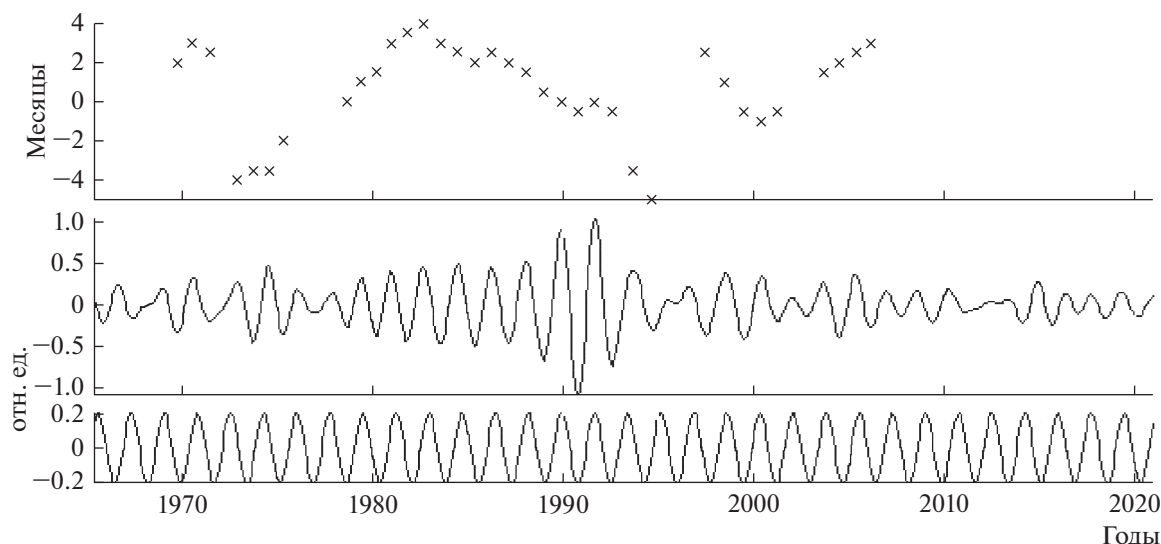


Рис. 6. То же, что и на рис. 2, но для данных о межпланетном магнитном поле.

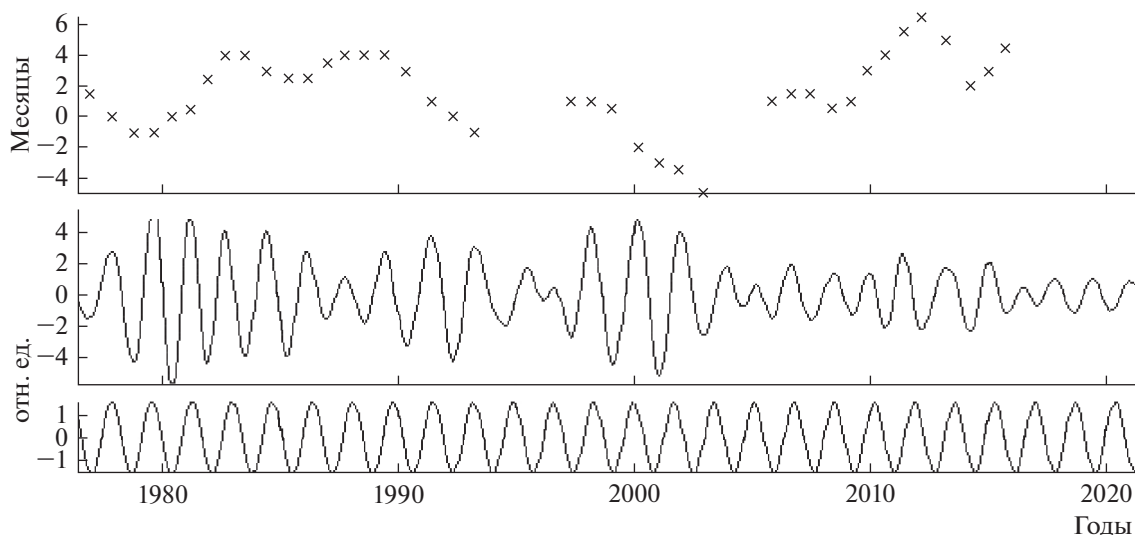


Рис. 7. То же, что и на рис. 2, но для данных о наклоне гелиосферного токового слоя.

тивные области концентрируются к границам секторной структуры магнитных полей на Солнце и тем сильнее, чем более мощные явления рассматриваются [16]. Наиболее яркие явления происходят в области активных долгот, и это должно приводить к тому, что нейтральная линия крупномасштабного магнитного поля Солнца проходит по активным долготам на поверхности Солнца [8, 9]. Квазидвухлетние вариации проявляются в зонах активных долгот.

В [10] проведен спектрально-временной анализ для каждого из секторов активных долгот и построены СВАН-диаграммы. Для этого использовался индекс S_{CR} , который рассчитывался для каждой группы солнечных пятен суммированием

ежедневных значений их площади за кэррингтоновский оборот. Показано, что КДВ представляют собой набор из нескольких вариаций с дискретными периодами в диапазоне 0.6–2.6 лет.

Также в [10] проведен автокорреляционный анализ данных для каждого из 4-х секторов активных долгот. Анализ показал, что в каждом секторе активных долгот присутствует вариация с периодом около 2.4 года. Также проведен кросскорреляционный анализ каждой из 2-х пар антиподальных долгот. Отмечается, что в течение значительной части времени сдвиг коэффициента кросскорреляции пар активных долгот близок к нулю, что свидетельствует о том, что вариации происходят в фазе.

По современным представлениям [5] в нижней части конвективной зоны в переходном слое между конвективной и лучистой зоной, в так называемом тахоклине, действует глубинное динамо, которое создает глобальное магнитное поле, которое всплывая, определяет всю структуру поля на поверхности.

В работах [17, 18] также показано, что появление нового магнитного потока на поверхности Солнца вызвано всплытием из глубины конвективной зоны не только сильных магнитных полей в активных областях, но и более слабых полей на больших площадях.

Поскольку КДВ проявляют стабильность фаз (и долготную устойчивость областей Солнца, ответственных за квазидвухлетнюю вариацию) в течение нескольких циклов СА, как показано в данной работе, это приводит к заключению, что КДВ обусловлены глубинными процессами в основной конвективной зоне Солнца, т.е. в тахоклине, где вращение происходит твердотельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Охлопков В.П.* Динамика квазидвухлетних вариаций космических лучей и солнечной активности // *Космич. исслед.* 2018. Т. 56. № 2. С. 111–118. (*Cosmic Research*. P. 101–107.)
2. *Охлопков В.П.* Квазипериодические вариации солнечной активности и космических лучей // *Вестник Московского университета. Физика. Астрономия.* 2018. № 2. С. 100–109.
3. *Охлопков В.П.* Спектральный анализ вариаций космических лучей, параметров солнечной активности и межпланетной среды // *Известия РАН. Сер. Физ.* 2017. Т. 81. № 2. С. 206–212.
4. *Berdyugina S.V., Usoskin I.G.* Active longitudes in sunspot activity: Century scale persistence // *Astronomy and Astrophysics.* 2003. V. 405. № 3. P. 1121–1128.
5. *Фомичев В.В., Обридко В.Н., Филиппов Б.П.,* Исследования по физике Солнца и солнечно-земным связям. <https://www.izmiran.ru/IZMIRAN75/STP/Fomichev.pdf>
6. *Malik A., Bohm M.* A Statistical Analysis of Sunspot Active Longitudes. <https://www.researchgate.net/publication/45872922>
7. *Обридко В.Н., Иванов Е.В., Чертопруд В.Е.* Крупномасштабное поле Солнца и активные долготы // *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН.* <http://player.myshared.ru/6/652751/>
8. *Ivanov E.V.* Active longitudes: structure, dynamics, and rotation // *Advances in Space Research.* 2007. V. 40. Is. 7. P. 959–969.
9. *Иванов Е.В.* Активные долготы: динамика, вращение, происхождение // *Известия РАН. Сер. Физ.* 2006. № 10. С. 1417–1422.
10. *Иванов Е.В.* Квазидвухлетние вариации суммарных площадей пятен в секторах активных долгот // *Сборник трудов конференции “Солнечная активность как фактор космической погоды”.* 2006. Пулковско. ГАО РАН. С. 357–366.
11. *Stozhkov Y.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A. et al.* Preprint of Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences. Moscow, 2007. <https://lebedev.ru/ru>
12. *Severny A.B.* Time Fluctuations of the General Magnetic Field of the Sun // *Quarterly J. Royal Astronomical Society.* 1971. V. 12. P. 363.
13. *Severny A., Wilcox J.M., Scherrer P.H., Colburn D.S.* Comparison of the mean photospheric magnetic field and the interplanetary magnetic field // *Solar Phys.* 1970. V. 15. P. 3–14.
14. *Котов В.А., Степанян Н.Н., Щербакова З.А.,* Роль фонового магнитного поля и полей активных областей в общем магнитном поле Солнца // *Изв. КрАО.* 1977. Т. 56. С. 75–83.
15. *Котов В.А., Демидов М.Л., Ханейчук В.И., Цан Т.Т.* О состоятельности измерений магнитного поля Солнца как звезды и годичная вариация магнитного поля // *Изв. КрАО.* 1998. Т. 94. С. 110–117.
16. *Bumba V., Obridko V.N.* Bartels active longitudes, sector boundaries and flare activity // *Solar Phys.* 1969. V. 6. P. 104–110.
17. *McIntosh P.S., Wilson P.R.* A new model for flux emergence and the evolution of sunspots and the large-scale fields // *Solar Phys.* 1985. V. 97. P. 59–79.
18. *Stenflo J.O.* On the Validity of the Babcock-Leighton Approach to Modeling the Solar Cycle // *Astronomical Society of the Pacific Conference Series.* 1992. V. 27. P. 83–88.