

В. И. Алексеев

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТНОГО ФАЗОВОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ СИГНАЛОВ К АНАЛИЗУ АСИММЕТРИЧНЫХ БАРИЦЕНТРИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ СОЛНЦА И ИЗМЕНЕНИЙ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ НА СОЛНЦЕ, ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ И В НЕДРАХ ЗЕМЛИ

Выполнен комплекс исследований, указывающих на то, что солнечная активность и процессы, связанные с нею, с высокой достоверностью согласованы с движением Солнца относительно барицентра, обусловленным воздействием сил гравитации между Солнцем, Юпитером, Сатурном, Ураном и Нептуном как системы взаимодействий многих тел. В качестве процессов, связанных с активностью Солнца, исследованы: изменения основных магнитных потоков, площадей полярных пятен, количество полярных факелов на полюсах Солнца; индекса геомагнитной активности и индекса отношения плазменного давления к магнитному солнечному ветру (СВ), медленных и высокоскоростных потоков СВ, интенсивности космических лучей (КЛ); среднегодовых значений вектора межпланетного магнитного поля и его составляющих; температуры, плотности и скорости потока плазмы СВ, синодического периода обращения Солнца как звезды, радиуса Солнца в относительных единицах; дальности географического полюса Земли от условного международного начала координат, скорости изменения положения северного магнитного полюса Земли, основных ионосферных параметров и угла наклона оси вращения Земли и вулканических извержений; асимметричного движения Солнца вокруг ЦМ Солнечной системы (в долях солнечного радиуса); расстояния от ЦМ Солнечной системы до Солнца в км, расстояния от ЦМ Солнечной системы до Земли. В основу исследований положено математическое вейвлетное преобразование наблюдений перечисленных выше переменных в тех или иных интервалах времени с последующим вычислением их фазочастотных и фазовременных характеристик, матриц корреляций между характеристиками. Исследуемые переменные разбиваются на группы, в которые входят барицентрическое движение Солнца и изменения солнечной активности. Вычисленные две матрицы корреляций вейвлетных характеристик группы переменных и графики этих характеристик в двух системах координат и отражают согласованность изменений группы переменных. Выполненные исследования указывают на то, что термоядерная реакция, происходящая в недрах Солнца, внешним проявлением которого является солнечная активность, управляется движениями крупных планет Солнечной системы относительно Солнца.

Ключевые слова: барицентрические движения Солнца, процессы на Солнце, комплексный вейвлет, одномерное вейвлет-преобразование, вейвлетные фазочастотные, фазовременные характеристики сигналов, матрицы корреляций вейвлетных характеристик.

В работе приведен обзор современных методов изучения динамики структурообразования материалов. Выполнен анализ возможностей методов динамической электронной микроскопии и оптических методов контроля структурно-фазового состояния материалов в высокотемпературных быстропотекающих процессах. Рассмотрены методы пирометрии в области СВС, газотермического напыления покрытий и аддитивного синтеза изделий из металла и керамики. Представлен обзор нового бесконтактного метода измерения температуры и спектральной степени черноты материалов. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на реализацию подхода пирометрического контроля структурообразования в высокотемпературных процессах. Приведен

пример комплексных исследований динамики структурных образований: металл-кислород, металл-углерод – на поверхности фольги вольфрама, молибдена и тантала, нагреваемой электрическим током в инертной газовой среде. В нем результаты пирометрических исследований сопоставлены с микроструктурой и микроэлементным составом фаз замороженных образцов. В завершении работы приведен вывод о рациональной организации контроля структурообразования в процессах высокотемпературного синтеза с точки зрения построения системы автоматического регулирования.

Ключевые слова: СВС, газотермическое напыление, аддитивный синтез, фаза, структура, температура, динамическая электронная микроскопия, тепловизионная съемка, степень черноты, материал.

V. I. Alekseev

APPLICATION OF THE WAVELET PHASE METHOD OF SIGNAL STUDY TO THE ANALYSIS OF ASYMMETRIC BARYCENTRIC MOTIONS OF THE SUN AND CHANGES IN PROCESSES OCCURRING ON THE SUN, NEAR-EARTH SPACE AND IN THE INTERIOR OF THE EARTH

A set of studies has been carried out, indicating that solar activity and processes associated with the activity of the Sun: changes in the main magnetic fluxes, areas of polar spots, the number of polar torches at the poles of the Sun; -index of geomagnetic activity and -index of the ratio of plasma pressure to magnetic solar wind (SW), slow and high-speed flows of SW, cosmic ray intensity (CR); average annual values of the interplanetary magnetic field vector and its components; the temperature, density, and flow rate of the SW plasma, the synodic period of the revolution of the Sun as a star, and the radius of the Sun in relative units; the distance of the Earth's geographic pole from the conventional international origin, the rate of change of the position of the Earth's north magnetic pole, the main ionospheric parameters; the angle of the Earth's axis of rotation and volcanic eruptions; asymmetric movement of the Sun around the solar system of the solar system (in fractions of the solar radius); the distances from the solar system's CM to the Sun in km, the distances from the solar system's CM to the Earth, with high accuracy, are consistent with the movement of the Sun relative to the barycenter. The research is based on the wavelet transformation of the observations listed above variables in various time intervals with the subsequent calculation of their phase-frequency and phase-time characteristics, correlation matrices between characteristics. The studied variables are divided into groups, which include the barycentric movement of the Sun and changes in solar activity. The calculated two correlation matrices of the wavelet characteristics of the group of variables and the graphs of these characteristics in two coordinate systems reflect the consistency of changes in the group.

The studies carried out indicate that the thermonuclear reaction occurring in the interior of the Sun, the external manifestation of which is solar activity, is controlled by the movements of the large planets of the Solar System relative to the Sun.

Key words: barycentric motions of the Sun, processes on the Sun, complex wavelet, one-dimensional wavelet transform, wavelet phase-frequency, phase-time characteristics of signals, correlation matrix of wavelet characteristics.

Введение

Солнце является основным источником гравитационной энергии в Солнечной системе и основным источником энергии, поступающей на Землю в волновом и корпускулярном излучении. Все изменения в физическом режиме Солнца находят отражение в состоянии околоземного космического пространства и планеты Земля [1]. В работе [2] установлено, что в барицентрическом движении Солнца присутствует хорошо выраженный период 178.77 года,

совпадающий с периодом 178.55 лет в ряде чисел Вольфа, характеризующих активность Солнца. В работах [3-6] утверждается, что Солнце является ретранслятором гравитации для всей Солнечной системы и движения крупных планет Солнечной системы индуцируют движения во всей Солнечной системе.

В научных статьях, изучающих явления, связанные с солнечной активностью, с изменениями ее магнитного поля, межпланетного магнитного поля (ММП), солнечного ветра (СВ), космических лучей (КЛ), параметров изменений ионосферы и магнитного поля Земли, причинами, контролирующими эти явления, связывают с неизвестными астрономическими силами, внешними факторами или не обсуждаются первичные причины возникновения этих процессов.

В работах [7-16] обсуждаются результаты, в которых проявляется влияние барицентрических движений Солнца на изменения климата на Земле, на изменения во вращении Земли.

В работе проводится анализ влияния барицентрических движений Солнца в рамках задачи многих тел [17-19], обусловленных воздействием Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна [5] на процессы, происходящие на Солнце, в межпланетном пространстве, магнитосфере и на Земле. Такими процессами на Солнце, рассмотренными в работе, являются изменения среднегодовых значений чисел Вольфа, плотности потока радиоизлучения, напряженности общего магнитного поля Солнца, вариации среднегодовых значений напряженности магнитного поля солнечных пятен в северной полярности [1], П-индексы крупномасштабного полярного магнитного поля Солнца, полученные на основе наблюдений в течение последних полутора столетий: а) солнечной короны во время полных солнечных затмений, представленных фотографиями и зарисовками различных наблюдателей в разное время; б) высокоширотных солнечных протуберанцев (волокон); широтно-временное распределение полярных факелов и солнечных пятен в северном и южном полушариях с 1955 по 1994 год [20]. Анализируются кривые изменений среднегодовых значений вектора ММП и элементов напряженностей этого поля, среднегодовые значения изменений температуры плазмы, плотности и скорости потока плазмы СВ, изменений интенсивности потока космических лучей, отклонений радиуса Солнца в относительных единицах, дальности географического полюса от условного международного начала координат, долговременных изменений ионосферного параметра $f - \min$ в МГц и изменений минимально действующей высоты следа отражений О-компоненты $h'F$, вариаций элементов магнитного поля Земли в нТл, временных вариаций индекса АА магнитной активности, количества магнитных бурь [1]. Важность изучения физических процессов, происходящих в солнечно-земных системах, на основе новых технических решений подчеркнута в работе [21]. В основу исследований положено математическое вейвлетное преобразование наблюдений (временных рядов) перечисленных выше переменных в тех или иных интервалах времени с последующим вычислением их фазочастотных и фазовременных характеристик, матриц корреляций между характеристиками.

Целью исследований является установление того, что солнечная активность и процессы, происходящие на Солнце, в межпланетном пространстве и на Земле, обусловлены барицентрическими движениями Солнца, влиянием крупных планет Солнечной системы, гравитационными силами.

Кривые изменений переменных, использованных при анализе, оцифрованы и приведены на рисунках 1-8. Характерным в изменениях этих кривых является то, что они циклические. В их частотном составе содержатся составляющие с периодами $\approx (11 \div 12)$, $\approx (19 \div 21)$ лет и другие. Периодичности переменных вычисляются с использованием временных вейвлетных фазовременных функций $\varphi_f(a, b)$ [22, 23].

МЕТОД АНАЛИЗА

Анализ кривых производится с использованием многомасштабного вейвлетного фазового метода, введенного и использованного в работах [22, 23]. Программа позволяет вычислить для каждой исследуемой кривой $f(t)$ две информативные характеристики: вейвлетные фазочастотную $a1_ \varphi_f(a, \bar{b})$ и $a2_ \varphi_f(\bar{a}, b)$ фазовременную, являющиеся основой для сравнительных исследований переменных $f_i(t), i=1, \dots, l$. Мгновенные фазовые характеристики функции $f(t)$ в пакете Matlab вычисляются с использованием преобразования $\varphi_f(a, b) = \text{angle}[Wf(a, b)]$, изменяющиеся в интервале $\pm \pi$ радиан, где многомасштабная комплекснозначная матрица $Wf(a, b)$ размерности $\dim(a) \times N$, N – число дискретных отсчетов сигнала $f(t)$ в исследуемом временном интервале $[t_n : t_k]$; характеристики $a1_ \varphi_f(a, \bar{b})$ и $a2_ \varphi_f(\bar{a}, b)$ получаются из матрицы $\varphi_f(a, b)$ усреднениями по b и a соответственно. Первая из них характеризует изменения фазы сигнала в зависимости от задаваемого масштаба a вейвлета, а вторая – изменения фазы сигнала во времени (фазовременная характеристика), позволяющие представить и сравнивать множество исследуемых сигналов в двух системах координат: $(a1, a(\text{частота}))$ и $(a2, b)$. Каждому значению масштаба a вейвлета соответствует определенная частота сигнала $f(t)$, и характеристика $a1_ \varphi_f(a, \bar{b})$ называется фазочастотной. Многомасштабное вейвлет-преобразование функции $f(t)$ производится по формуле [24]

$$Wf(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R f(t) \cdot \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} \cdot dt. \quad (1)$$

В формуле (1) функция $\overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}$ – комплексно-сопряженный вейвлет с параметрами

$a(1:k)$ и b , где b – параметр сдвига на временной оси (в вычислениях b изменяется в интервале $t_n : t_{k_a}$ с N -отсчетами); максимальное значение k масштаба a вейвлета, задаваемое исследователем, определяется частотным составом сигнала $f(t)$ и интервалом времени его наблюдения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В исследованиях, показывающих статистическую зависимость процессов, происходящих на Солнце, в межпланетном пространстве и на Земле с барицентрическими движениями Солнца и солнечной активности в заданных интервалах времени, для выбранных групп переменных вычисляются их вейвлетные фазочастотные и фазовременные характеристики и для сравнения отображаются в двух системах координат, указанных выше; вычисляются также линейные коэффициенты корреляций между сравниваемыми характеристиками переменных и представляются в двух таблицах.

А. Характеристики изменений во времени расстояния центра масс Солнца от барицентра, солнечной активности и солнечной постоянной с 1656.5 до 2009 года

На графиках рисунка 1а) – 1с) представлены графики изменений барицентрических движений Солнца $Rbar$, солнечной активности $Sact$, солнечной постоянной $Sconst$ и их вейвлетных d) фазочастотных $a1_ \varphi_f(a, \bar{b})$, e) фазовременных $a2_ \varphi_f(\bar{a}, b)$ характеристик, а также f) разности фазовременной характеристики $a2_ Sact - a2_ Rbar$ переменных $Sact$ и $Rbar$, сглаженных по 20-ти отсчетам.

Вейвлетные характеристики переменных вычислены по наблюдениям в 1656.5–2009 годы при масштабах вейвлета $a = 1:1100$. При этом в исследуемых гелиокосмических сигналах $f_i(t), i = 1, 2, 3$ выделяются все гармоники сигналов, соответствующие наблюдаемому интервалу времени. Этот интервал можно оценить построением функций $\varphi_{f_i}(a, b)$ и характеристик

$a1_ \varphi_{f_i}(a, \bar{b}), i = 1, 2, 3$, как, например, на рисунке 1 d). На этом рисунке все бифуркации функций $\varphi_{f_i}(a, b)$, острые пики на графиках находятся левее точки $k = 1100$. Применяя метод оценивания периодичностей сигналов, изложенный в [Алексеев, 2020], получены оценки периодов сигналов в годах при заданных значениях k вейвлетных масштабов a :

$$\varphi_{Sact}(950, b) \approx 184.9, \varphi_{Sact}(75, b) \approx 11.1(1.7); \varphi_{Rbar}(625, b) = 178.2,$$

$$\varphi_{Rbar}(125, b) \approx 20(0.8), \varphi_{Rbar}(50, b) \approx 12.8(1.9); \varphi_{Sconst}(950, b) \approx 144.8(1.9)$$

$$\varphi_{Sconst}(50, b) \approx 10.9(2.73) \quad \text{В скобках указаны стандартные отклонения оценок периодичностей сигналов, вычисленные для числа периодов, больших 2-м.}$$

В исследуемом интервале времени зафиксированы значительные климатические изменения: минимумы Маундера, Дальтона, современный максимум и современный минимум третьей фазы малого ледникового периода [7]. Эти характеристики отображают индивидуальные особенности изменений сигналов $f_i(t), i = 1, 2, 3$, изменения их усредненных по времени и вейвлетным масштабам мгновенных фаз сигналов. Заметим, что на рисунках задаваемым масштабам вейвлета a соответствуют частоты изменений переменных. Графики на рисунках получены при использовании комплексного вейвлета 'cgau5'.

В таблице 1 приведены средние значения опережений (запаздываний) фазовременных характеристик переменных в трех характерных интервалах времени 1656,5–1719, 1719,1–1891, 1891,1–2009 годы, из которых и графиков рисунков 1d) и 1e) следует, что изменения переменных $Sact$ и $Sconst$ строго следуют изменениям барицентрических движений Солнца $Rbar$ в фазочастотной и фазовременной областях; изменения переменных происходят в совпадающих фазах и в противофазах. При этом в среднем интенсивность роста $Rbar$ опережает интенсивность роста $Sact$ на 0.053 радиана с $\sigma = 0.879$ и отстает от интенсивности роста $Sconst$ на -0.135 радиан с $\sigma = 0.592$.

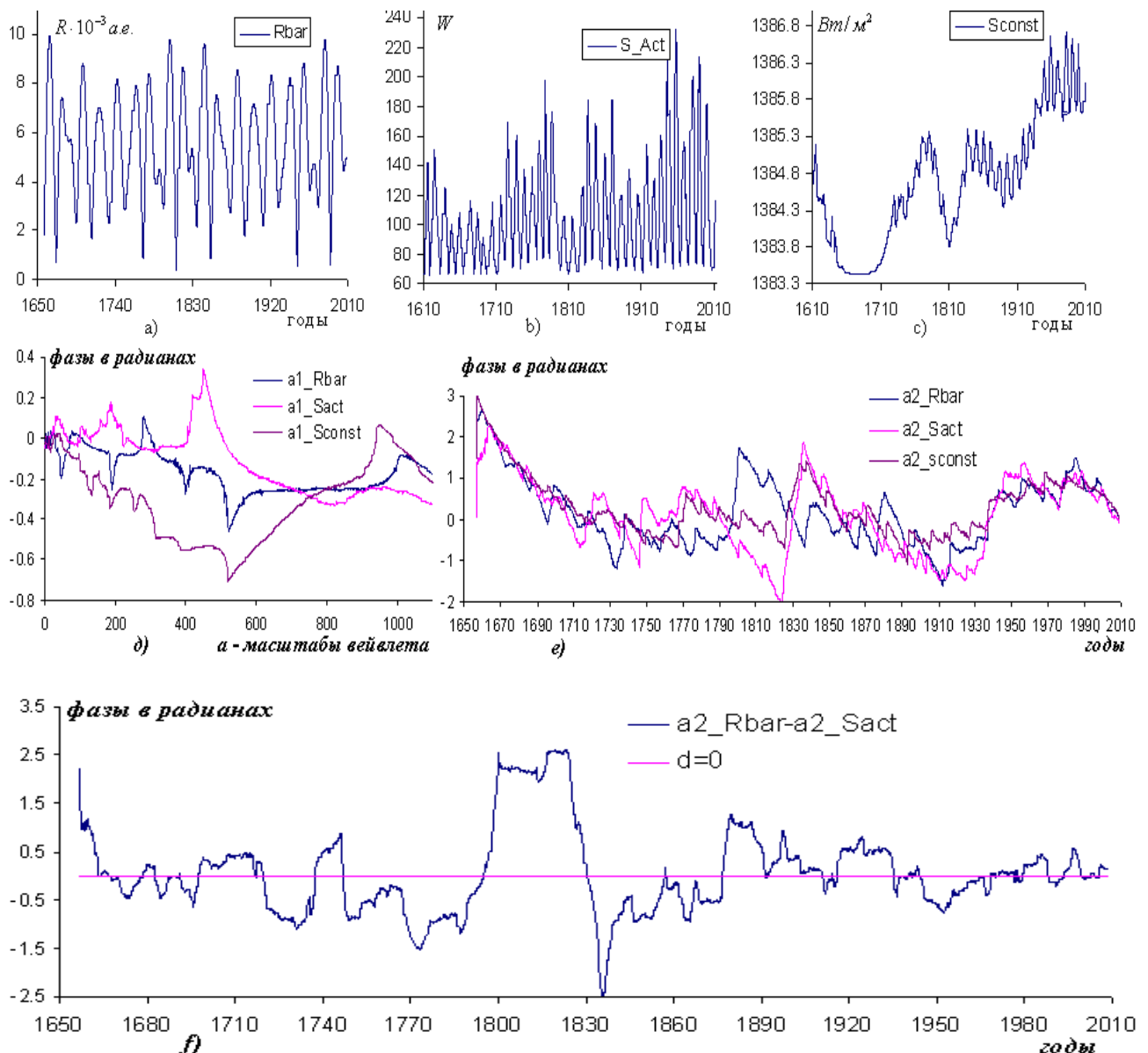
Таблица 1

Относительные опережения (запаздывания) вейвлетных фазовременных характеристик переменных в радианах, приведенных на графике рисунка 1 e) в соответствующих интервалах времени

Разности фазовременных характеристик переменных	Годы, средние значения опережений (запаздываний) mean и σ в скобках			
	1656.5–1719	1719.1–1891	1891.1–2009	1656.5–2009
$a2_Rbar - a2_Sact$	0.12 (0.41)	0.01 (1.19)	0.08 (0.34)	0.05 (0.87)
$a2_Rbar - a2_Sconst$	-0.14 (0.24)	-0.11 (0.78)	-0.17 (0.34)	-0.14 (0.59)
$a2_Sconst - a2_Sact$	0.26 (0.38)	0.12 (0.56)	0.25 (0.50)	0.19 (0.52)

Характерным в согласованных изменениях графиков фазовременных характеристик $a2_f(a, b)$ барицентрических движений Солнца, солнечной активности и солнечной постоянной в интервале времени 1656.5–2009 годы является то, что эти движения асимметричны, не стационарны в каждом из временных интервалов; в минимуме Маундера, в 1645–1715 годы, все три переменные находятся в положительной фазе уменьшения, в которой замедле-

ние фазы $Rbar$ опережает замедление фазы $Sact$ на 0.12 радиана с $\sigma = 0.41$. В минимуме Дальтона, в 1790–1820 годы, изменения $Rbar$ и $Sact$ находятся в существенных противофазах, резкому росту фазы переменной $Rbar$ в интервале 1792–1801 годы соответствует резкое падение фазы переменной $Sact$ в 1792–1824 годы. В интервале 1790–1820 годы в среднем изменение $Rbar$ опережает изменение $Sact$ на 1.595 радиан с $\sigma = 1.0324$. В среднем в интервале времени 1719.1–1891 годы сумма разностей фаз $Rbar$ и $Sact$ составляет 0.01 радиан с большим $\sigma = 1.19$ разбросом в радианах. На рисунке 1 f) представлен график изменения разности усредненных мгновенных фаз $a2_Sact(t) - a2_Rbar(t)$, на котором выделяются минимумы Маундера и Дальтона; в особенности минимум Дальтона. В этих минимумах изменения фаз переменных $a2_Sact$ и $a2_Rar$ происходят в противофазах, переменная $a2_Rar$ находится в положительной фазе роста.



*Применение вейвлетного фазового метода исследования сигналов
к анализу асимметричных барицентрических движений Солнца и
изменений процессов, происходящих на Солнце, околоземном
пространстве и в недрах Земли*

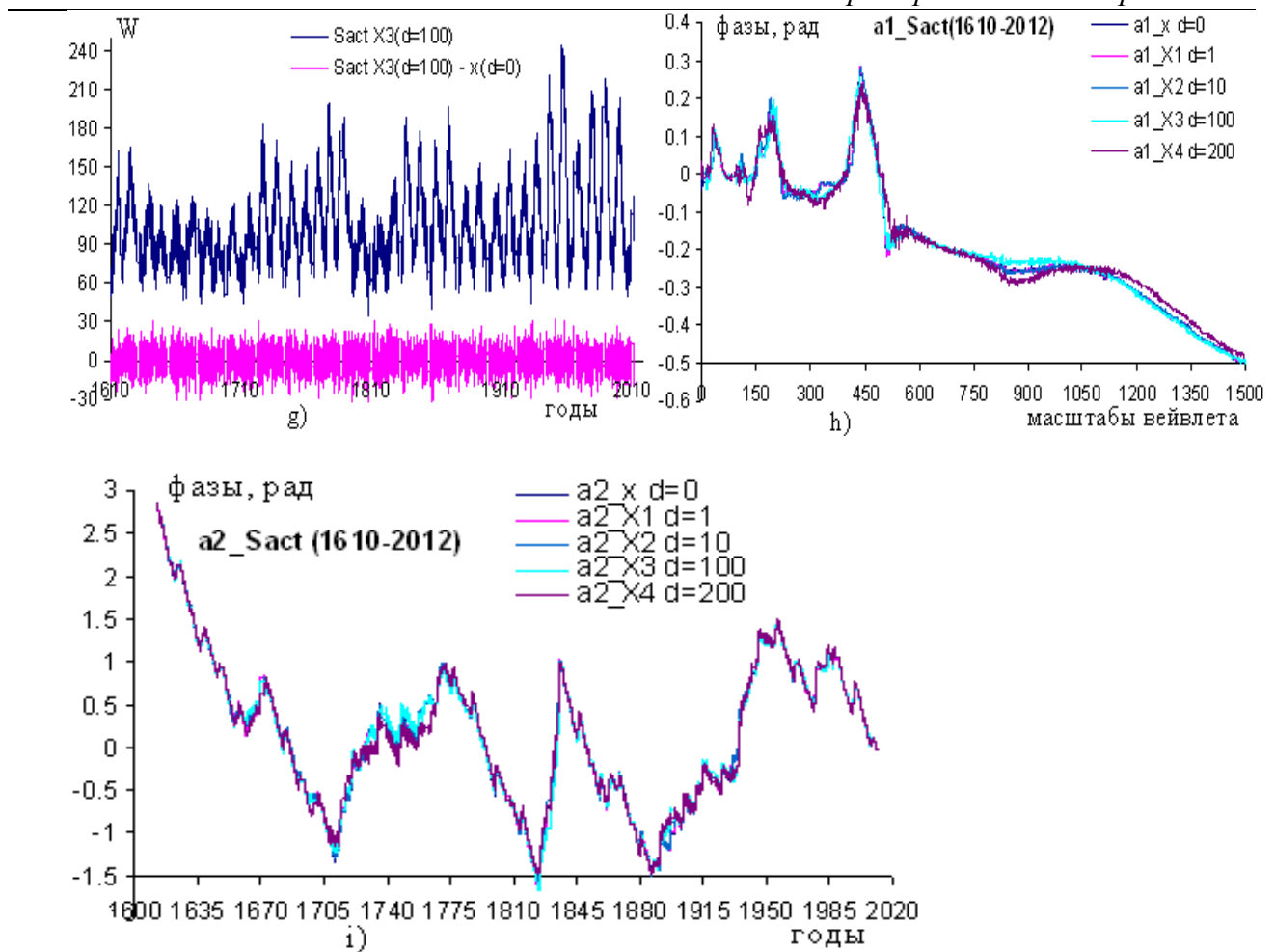


Рисунок 1. Графики изменений: а) расстояния центра масс Солнца от барицентра $Rbar$ в $10^{-3} a.e.$ на интервале 1656.5–2009 гг. с учетом Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна [5]; б) солнечной активности $Sact$ на интервале 1610–2012 гг. [6]; в) солнечной постоянной $Sconst$ на интервале 1610–2010 гг. [Абдусаматов, 2009]; вейвлетных д) фазочастотных и е) фазовременных характеристик переменных на интервале времени 1656.5–2009 гг.; ф) – разности фаз между фазовременными характеристиками переменных $Sact$ и $Rbar$ в интервале времени 1656.6–2009 гг., усредненные по 20 точкам; г) изменений солнечной активности с аддитивной нормально распределенной помехой с дисперсией $d=100$ и помехи (выделен цветом); h) и i) изменений вейвлетных фазочастотных $a1_Sact$ и фазовременных $a2_Sact$ характеристик солнечной активности, на которые наложены аддитивные помехи нормального распределения с дисперсиями $d=0, 1, 10, 100, 200$ единиц соответственно.

На рисунке 1 е), в интервале 1950–2004 годы, так называемого современного максимума солнечной активности, наблюдается рост характеристик всех трех переменных; причем интенсивные росты фаз переменных происходили с 1912 по 1947 год, затем до 2000 года изменялись колебательно в положительной фазе; в интервале времени 2000–2009 годы фазовременные характеристики переменных уменьшались монотонно.

Линейные коэффициенты корреляций между вейвлетными фазочастотными и фазовременными характеристиками факторов $Rbar$, $Sact$, $Sconst$ по наблюдениям в 1656,5–2009 годы

	$a1_{\varphi_f}(a, \bar{b})$ – фазочастотные характеристики			$a2_{\varphi_f}(\bar{a}, b)$ – фазовременные характеристики		
Факторы	$Rbar$	$Sact$	$Sconst$	$Rbar$	$Sact$	$Sconst$
$Rbar$	1.00			1.00		
$Sact$	0.46	1.00		0.48	1.00	
$Sconst$	0.42	-0.30	1.00	0.69	0.82	1.00

Примечание. Коэффициенты корреляций $r > |0.1|$ значимы с вероятностью 0,95 по критерию Стьюдента [26].

Таблица 2 корреляций между характеристиками $a1_{\varphi_f}(a, \bar{b})$ и $a2_{\varphi_f}(\bar{a}, b)$ является характеристикой согласованности изменений графиков, приведенных на рисунках 1 d) и 1 e) соответственно, высокую положительную согласованность изменений $Sact$, $Sconst$ с изменениями $Rbar$ в двух пространствах: фазочастотной и фазовременной.

Помехоустойчивость алгоритма. Представляет самостоятельный интерес исследование на помехоустойчивость используемого метода вычисления характеристик $a1_{\varphi_f}(a, \bar{b})$ и $a2_{\varphi_f}(\bar{a}, b)$ с использованием вейвлетного многомасштабного преобразования (1). В работе используется множество графиков гелиокосмических и климатических переменных, характеризующих изменения в солнечно-земной системе продолжительное время. Графики изменений переменных получены современными измерительными средствами, содержащими, как правило, как истинные значения измеряемых величин, так и погрешности, возникающие из-за методов измерения. Используемые графики переменных преобразуются в цифровой формат, при котором также появляются шумы дискретизации. При преобразовании инструментальных данных в цифровой формат с соблюдением неравенства Котельникова $0 < \Delta t < 1/(2 \cdot f_c)$, где Δt – шаг дискретизации, f_c – верхняя граничная частота в наблюдениях, математическая модель наблюдений исследуемых переменных, содержащих аддитивные помехи, представлена в виде

$$y(t) = s(t) + \text{sqrt}(d) * \text{randn},$$

где $s(t)$ – наблюдаемая переменная, d – дисперсия помехи, randn – датчик нормально распределенных случайных чисел, $y(t)$ – выход модели наблюдений с задаваемым уровнем помехи. В исследованиях шаг дискретизации Δt задан в виде $\Delta t = 0.1$ лет.

На рисунке 1 g) представлен график модели наблюдений солнечной активности $Sact$ с аддитивной нормально распределенной помехой с дисперсией $d = 100$, график сгенерированного шума представлен цветом; $s(t)$ – исходный график $Sact$ приведен на рисунке 1 b). На графиках рисунков 1 h) и 1 i) представлены результаты преобразований моделей наблюдений $y(t)$, т. е. вейвлетных фазочастотных $a1_{\varphi_f}(a, \bar{b})$ и фазовременных $a2_{\varphi_f}(\bar{a}, b)$ характеристик при значениях дисперсий помех: $d = \sigma^2 = 0, 1, 10, 100, 200$; на этих графиках помехи наблюдений $Sact$, равномерно распределенные по всей кривой на рисунке 1 g), в преобразованиях $a1_{\varphi_f}(a, \bar{b})$ и $a2_{\varphi_f}(\bar{a}, b)$ на графиках рисунков 1 h) и 1 i), проявляются в окрестностях характерных точек: бифуркаций и в интервалах неравномерных изменений фазы переменной.

Помехоустойчивость вычисления вейвлетных фазочастотных и фазовременных
характеристик солнечной активности S_{act} по наблюдениям в 1610–2012 годы

Уровен и помех σ	mean, rad		std, rad	
	$a1 \cdot 10^{-4}$	$a2 \cdot 10^{-4}$	$a1 \cdot 10^{-2}$	$a2 \cdot 10^{-2}$
1	0.9	-0.9	0.4	1.1
3.16	-1	1	0.8	2.2
10	1.4	-1.4	1.8	6.6
14.14	2.4	-2.4	2.5	8.2

В первом столбике таблицы приведены стандартные отклонения σ задаваемой помехи на наблюдения солнечной активности (максимальное значение S_{act} в интервале наблюдения составляет 272). В следующих столбиках таблицы 2 а) приведены полученные точности вычислений характеристик $a1_{\varphi_{S_{act}}(a, \bar{b})}$ и $a2_{\varphi_{S_{act}}(a, b)}$: среднего $mean$ и std в радианах. В таблице проявляются следующие особенности: а) точности оцениваний среднего $mean$ и стандартного отклонения std отличаются примерно на два порядка, точнее, оцениваются средние значения; б) оценки точностей средних значений $mean$ характеристик $a1_{\varphi_{S_{act}}(a, \bar{b})}$ и $a2_{\varphi_{S_{act}}(a, b)}$ совпадают по абсолютной величине, оценки стандартных отклонений std характеристики $a2_{\varphi_{S_{act}}(a, b)}$ примерно в три раза хуже оценок характеристики $a1_{\varphi_{S_{act}}(a, \bar{b})}$; скорее всего, это связано с задаваемой размерностью 1500×4021 матрицы $\varphi_{S_{act}}(a, b)$, ее усреднением по числу столбцов при вычислении $a1_{\varphi_{S_{act}}(a, \bar{b})}$ и усреднением $\varphi_{S_{act}}(a, b)$ по числу строк при вычислении $a2_{\varphi_{S_{act}}(a, b)}$; в) примечательно то, что применение вейвлетного метода оценивания фазовых характеристик сигнала позволяет подавлять значительные уровни помех; из таблицы 2 а) этот уровень примерно составляет $D_p = 21$ дБ (отношения уровня помех на входе к уровню оценок точности вейвлетной характеристики $a2_{\varphi_{S_{act}}(a, b)}$).

Такие же исследования проведены с использованием барицентрических движений Солнца $Rbar$ и вулканических извержений на Земле; метод вычисления $a1_{\varphi_f(a, \bar{b})}$ и $a2_{\varphi_f(a, b)}$ использован для анализа гелиокосмических и климатических переменных в работе [22].

Б. Характеристики изменений во времени расстояния центра масс Солнца от барицентра, солнечной активности, знакопеременных и основных рядов среднегодовых значений П-индекса в северном N и южном S полушариях Солнца с 1863,7 до 2005,7 года

На графиках рисунка 2 приведены изменения знакопеременных а) NP_index_Sun , б) SP_index_Sun и основных в) $NP_index_Osn_Sun$, г) $SP_index_Osn_Sun$ рядов среднегодовых значений П-индекса в северном N и южном S полушариях Солнца [20], характеризующие изменяющиеся во времени магнитные потоки на полюсах Солнца и их вейвлетные е) фазочастотные и ф) фазовременные характеристики. В таблицах 3 а) и б) приведены коэффициенты линейных корреляций между одноименными характеристиками вейвлетных преобразований.

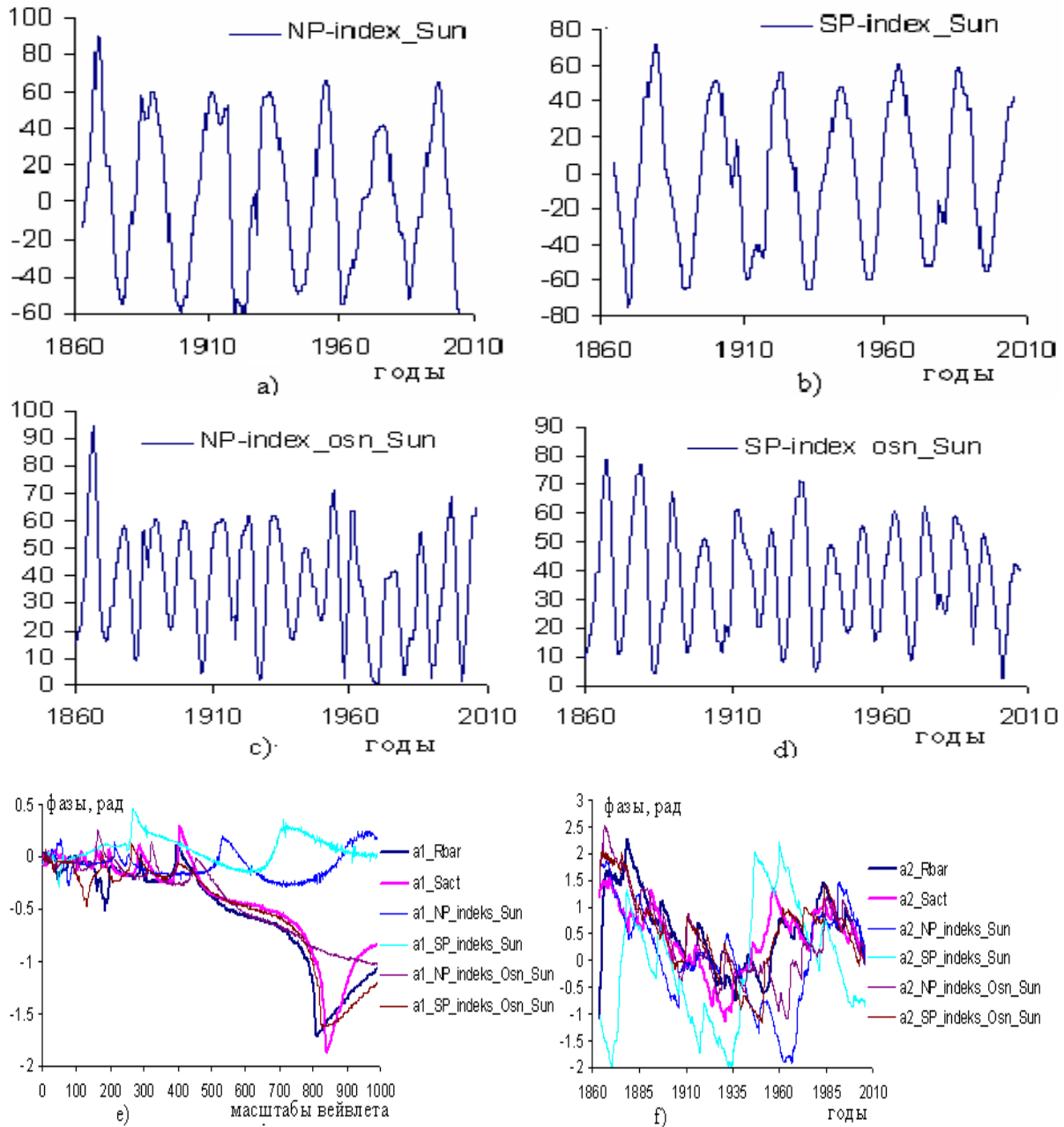


Рисунок 2. Графики изменений знакопеременных $a) NP_index_Sun$, $b) SP_index_Sun$ и основных $c) NP_index_Osn_Sun$, $d) SP_index_Osn_Sun$ рядов среднегодовых значений П-индекса в северном N и южном S полушариях Солнца и их вейвлетных фазочастотных $e) a1_φ_f(a, \bar{b})$ и фазовременных $f) a2_φ_f(\bar{a}, b)$ характеристик: барицентрических движений Солнца $Rbar$, солнечной активности $Sact$, знакопеременных и основных временных рядов среднегодовых значений П-индекса в северном и южном полушариях Солнца.

Таблица 3а

Линейные коэффициенты корреляций между вейвлетными фазочастотными характеристиками факторов $Rbar$, $Sact$, NP_index_Sun , SP_index_Sun , $NP_index_Osn_Sun$, $SP_index_Osn_Sun$

	$a1_{\varphi_f(a, \bar{b})}$ – фазочастотные характеристики					
Факторы	$Rbar$	$Sact$	NP_index_Sun	SP_index_Sun	$NP_index_osn_Sun$	$SP_index_osn_Sun$
$Rbar$	1					
$Sact$	0.96	1				
NP_index_Sun	-0.14	-0.12	1			
SP_index_Sun	-0.05	-0.03	-0.43	1		
$NP_index_osn_Sun$	0.92	0.88	-0.14	-0.03	1	
$SP_index_osn_Sun$	0.96	0.96	-0.23	0.01	0.91	1

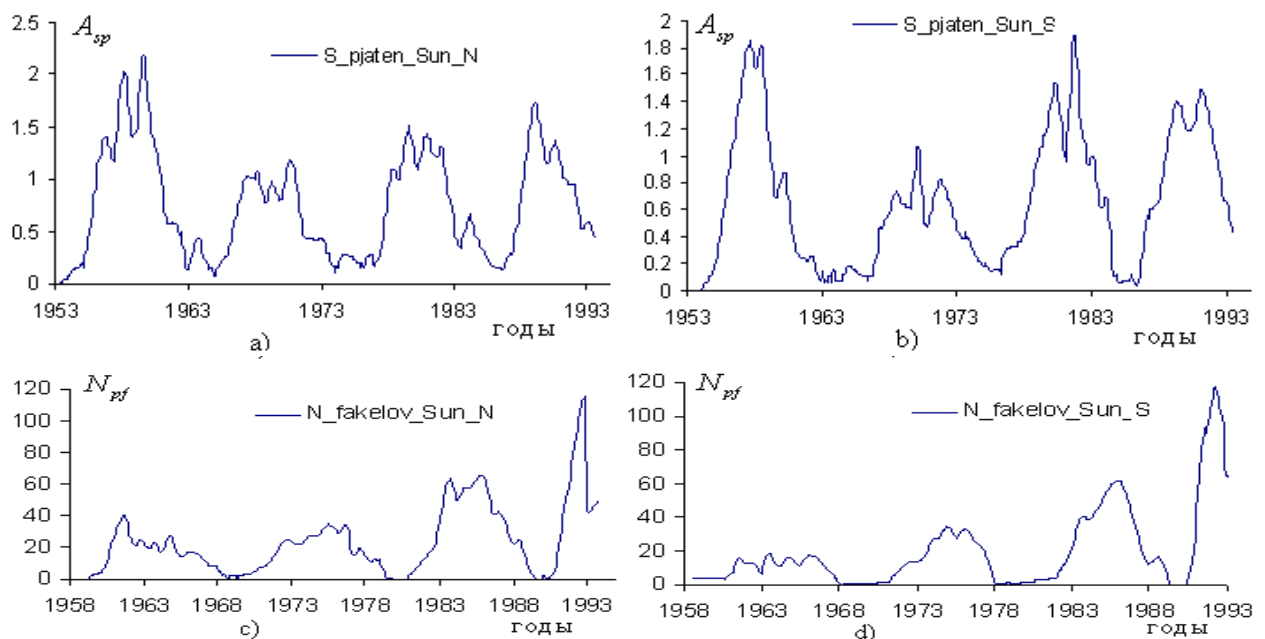
Из графиков рисунка 2 и таблиц 3а и 3б линейных корреляций между одноименными вейвлетными характеристиками наблюдается значительная статистическая зависимость изменений переменных: барицентрических движений Солнца $Rbar$, солнечной активности $Sact$, П-индекса основных значений полярных магнитных полей Солнца $NP_index_Osn_Sun$ и $SP_index_Osn_Sun$ с коэффициентами $k \geq 0.88$ в фазочастотных и с $k \geq 0.53$ в фазовременных координатах по наблюдениям в 1863.7–2005.7 годы. Из этих же данных наблюдается слабая статистическая зависимость изменений знакопеременных рядов среднегодовых значений NP - и SP -индексов в полушариях Солнца при барицентрических движениях Солнца и солнечной активности с $k \leq -0.14$ в фазочастотных и с $k \leq 0.46$ в фазовременных координатах. Особенности наблюдений знакопеременных рядов среднегодовых значений NP - и SP -индексов в полушариях Солнца, в отличие от наблюдений П-индекса основных значений полярных магнитных полей Солнца $NP_index_Osn_Sun$ и $SP_index_Osn_Sun$, барицентрических движений Солнца $Rbar$ и солнечной активности $Sact$, является то, что в их частотном составе слабо выражены колебания с периодом ≈ 11 лет; графики изменений их фазочастотных характеристик $a1_{\varphi_f(a, \bar{b})}$ существенно отличаются от сравниваемых переменных на рисунке 2е). Эти же отличия наблюдаются и на временной области изменений фазовременных характеристик рисунка 2 ф), наблюдаются нестационарность влияния барицентрических движений Солнца на изменения солнечной активности и NP - и SP -индексов. В таблицах корреляций 3а и 3б наблюдается также асимметричность взаимодействий основных рядов среднегодовых значений П-индекса в северном N и южном S полушариях Солнца с их знакопеременными значениями в фазочастотной и фазовременных областях.

Линейные коэффициенты корреляций между вейвлетными фазовременными характеристиками факторов: $Rbar$, $Sact$, NP_index_Sun , SP_index_Sun , $NP_index_Osn_Sun$, $SP_index_Osn_Sun$

	$a2_ \varphi_f(\bar{a}, b)$ – фазовременные характеристики					
Факторы	$Rbar$	$Sact$	NP_index_Sun	SP_index_Sun	$NP_index_osn_Sun$	$SP_index_osn_Sun$
$Rbar$	1					
$Sact$	0.68	1				
NP_index_Sun	0.46	0.25	1			
SP_index_Sun	0.16	0.40	-0.55	1		
$NP_index_osn_Sun$	0.67	0.53	0.80	-0.27	1	
$SP_index_osn_Sun$	0.77	0.67	0.53	-0.05	0.74	1

Примечание. Коэффициенты корреляций $r > |0.1|$ значимы с вероятностью 0,95 по критерию Стьюдента [26].

В. Характеристики изменений во времени расстояния центра масс Солнца от барического, солнечной активности, площадей полярных пятен $S_pyatna_Sun_N$, $S_pyatna_Sun_S$ и количества полярных факелов $N_fakelov_Sun_N$, $N_fakelov_Sun_S$ в северном N и южном S полушариях Солнца по наблюдениям в 1959.4–1993.6 годы [32]



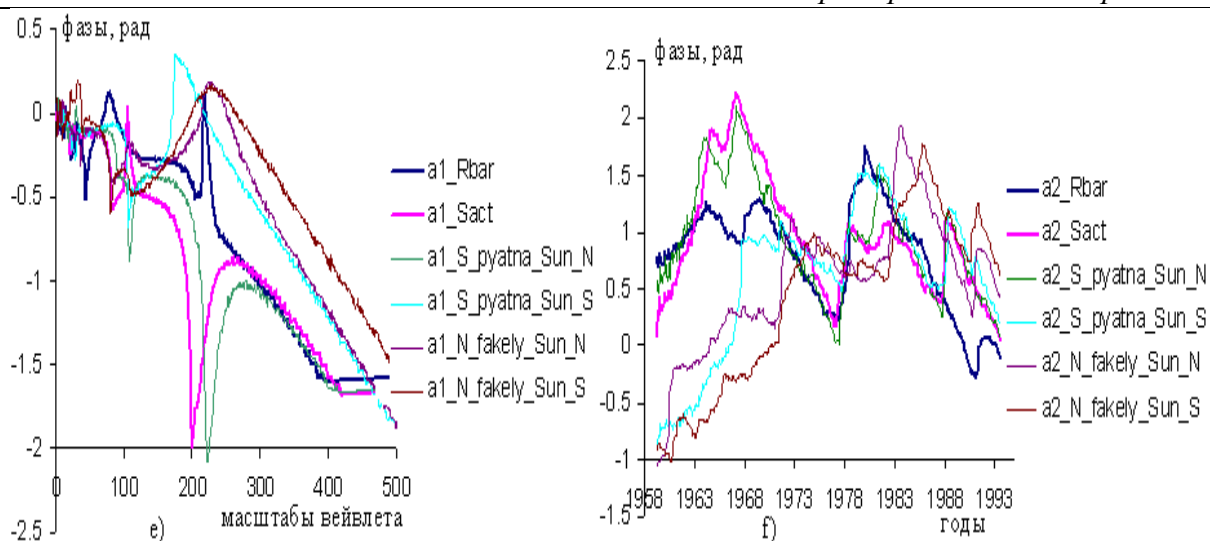


Рисунок 3. Графики изменений площадей полярных пятен а) $S_pyatna_Sun_N$, б) $S_pyatna_Sun_S$, числа полярных факелов в) $N_fakelov_Sun_N$ д) $N_fakelov_Sun_S$ в северном N и южном S полушариях Солнца, вейвлетных е) фазочастотных $a1_φ_f(a, \bar{b})$ и ф) фазо-временных $a2_φ_f(\bar{a}, b)$ характеристик переменных: барицентрических движений Солнца $Rbar$, солнечной активности $Sact$, площадей полярных пятен $S_pyatna_Sun_N$, $S_pyatna_Sun_S$ и числа полярных факелов в северном N и южном S полушариях Солнца.

Таблица 4а

Линейные коэффициенты корреляций между вейвлетными фазочастотными
характеристиками факторов: $Rbar$, $Sact$, $S_pyatna_Sun_N$, $S_pyatna_Sun_S$,
 $N_fakelov_Sun_N$, $N_fakelov_Sun_S$

	$a1_φ_f(a, \bar{b})$ – фазочастотные характеристики					
факторы	$Rbar$	$Sact$	$S_pyatna_Sun_N$	$S_pyatna_Sun_S$	$N_fakelov_Sun_N$	$N_fakelov_Sun_S$
$Rbar$	1					
$Sact$	0.84	1				
$S_pyatna_Sun_N$	0.85	0.89	1			
$S_pyatna_Sun_S$	0.90	0.71	0.75	1		
$N_fakelov_Sun_N$	0.86	0.72	0.66	0.95	1	
$N_fakelov_Sun_S$	0.76	0.63	0.68	0.92	0.97	1

Линейные коэффициенты корреляций между вейвлетными фазовременными характеристиками факторов: $Rbar$, $Sact$, $S_pyatna_Sun_N$, $S_pyatna_Sun_S$, $V_fakely_Sun_N$, $N_fakely_Sun_N$

	$a2_ \varphi_f(a, \bar{b})$ – фазовременные характеристики					
факторы	$Rbar$	$Sact$	$S_pyatna_Sun_N$	$S_pyatna_Sun_S$	$N_fakely_Sun_N$	$N_fakely_Sun_S$
$Rbar$	1					
$Sact$	0.57	1				
$S_pyatna_Sun_N$	0.67	0.92	1			
$S_pyatna_Sun_S$	0.12	0.04	-0.01	1		
$N_fakely_Sun_N$	-0.12	-0.22	-0.29	0.68	1	
$N_fakely_Sun_S$	-0.37	-0.48	-0.54	0.68	0.90	1

Примечание. Коэффициенты корреляций $r > |0.1|$ значимы с вероятностью 0.95 по критерию Стьюдента [26].

Из графиков рисунка 3е и таблицы корреляций 4а следует, что фазочастотные характеристики солнечной активности, площадей солнечных пятен и частоты появлений факелов на полярных областях Солнца значительно коррелированы с изменениями фазочастотных характеристик барицентрических движений Солнца с $k \geq 0.76$; при масштабах вейвлета $130 < a < 284$ наблюдается, что изменения солнечной активности и площадей пятен в северном полушарии Солнца происходят в противофазе с движениями Солнца относительно барицентра, изменениями числа появлений факелов на полушариях и площадей пятен в южном полушарии; изменения площадей пятен на полушариях Солнца находятся в противофазах. Последнее отображается графиками на рисунке 3е и таблицей корреляций 4б. В фазовременной области наблюдаются сильные нестационарные изменения групп переменных с образованием расходящихся и сходящихся перемежаемых областей с периодом около 5 лет, обусловленные внутренней динамикой процессов на Солнце под воздействиями гравитационных сил планет Солнечной системы.

Г. Характеристики изменений во времени расстояния центра масс Солнца от барицентра $Rbar$, солнечной активности $Sact$, Ap – индекса геомагнитной активности ($Ap - ind$), β – параметра отношения плазменного давления к магнитному солнечному ветру ($beta - para$) [27], коэффициентов асимметрии распределения азимутов межпланетного магнитного поля (ММП) медленного солнечного ветра (СВ) ($As.MMP.medl$) и хвостовой части высокоскоростных потоков СВ ($As.MMP.bystr$) [31], межпланетного магнитного поля ММП [1] и интенсивности космических лучей ($Intensiv.KL$) по наблюдениям в 1965.1–2009 годы

На рисунке 4 представлены графики переменных $a) - f)$, перечисленных выше, и их вейвлетные $g)$ фазочастотные и $h)$ фазовременные характеристики.

*Применение вейвлетного фазового метода исследования сигналов
к анализу асимметричных барицентрических движений Солнца и
изменений процессов, происходящих на Солнце, околоземном
пространстве и в недрах Земли*

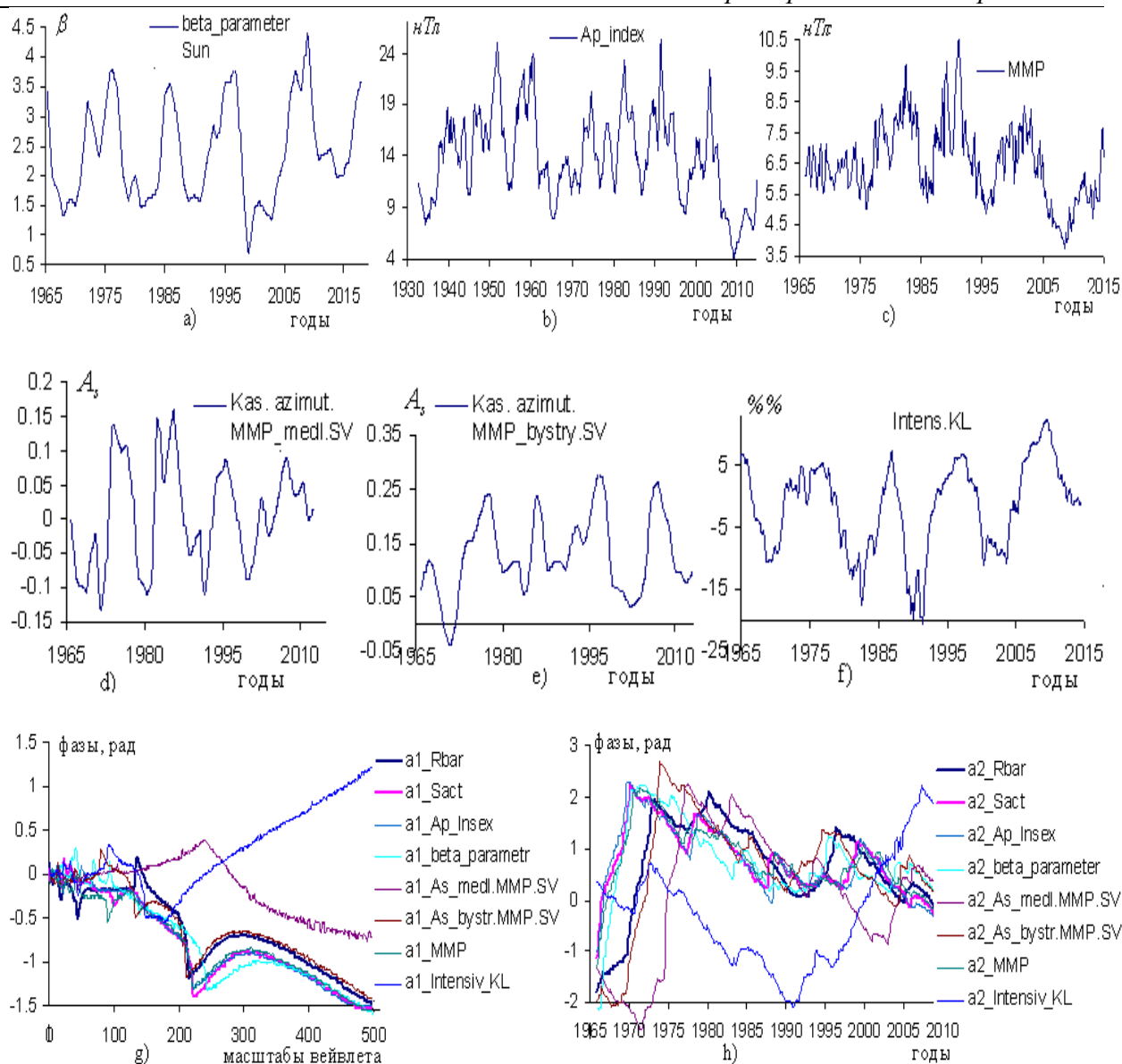


Рисунок 4. Графики изменений: а) β – параметра отношения плазменного давления к магнитному солнечному ветру ($\beta - parametr$), б) Ap – индекса геомагнитной активности ($Ap - ind$), в) межпланетного магнитного поля MMP [1]; д) коэффициентов асимметрии распределения азимутов MMP : медленного СВ и е) хвостовой части высокоскоростных потоков СВ, ф) интенсивности космических лучей ($Intensiv.KL$), вейвлетных г) фазочастотных $a1_{\phi}(a,b)$ и h) фазовременных $a2_{\phi}(a,b)$ характеристик переменных: барицентрических движений Солнца $Rbar$, солнечной активности $Sact$, Ap – индекса геомагнитной активности Земли ($Ap - ind$), $\beta - parametr$ отношения плазменного давления к магнитному солнечного ветра ($\beta - ind$), коэффициентов асимметрии распределения азимутов MMP медленного СВ и хвостовой части высокоскоростных потоков СВ, MMP и интенсивности космических лучей $Intensivn.KL$ [1]

Таблица 5а

Линейные коэффициенты корреляций между вейвлетными фазочастотными характеристиками факторов: $Rbar$, $Sact$, $Ap-ind$, $\beta-parametr$, $As.MMP.medl$, $As.MMP.bystry$, MMP и $Intensiv.KL$

	$a1_ \varphi_f(a, \bar{b})$ – фазочастотные характеристики							
факторы	$Rbar$	$Sact$	$Ap-ind$	$\beta-param$	$As.MMP.medl$	$As.MMP.bystry$	MMP	KL
$Rbar$	1							
$Sact$	0.96	1						
$Ap-ind$	0.97	0.98	1					
$\beta-param$	0.91	0.96	0.95	1				
$As.MMP.medl$	0.64	0.55	0.64	0.59	1			
$As.MMP.bystry$	0.94	0.96	0.97	0.93	0.58	1		
MMP	0.97	0.99	0.98	0.95	0.58	0.96	1	
KL	-0.76	-0.67	-0.72	-0.69	-0.90	-0.67	-0.71	1

Таблица 5б

Линейные коэффициенты корреляций между вейвлетными фазовременными характеристиками факторов: $Rbar$, $Sact$, $Ap-ind$, $\beta-parametr$, $As.MMP.medl$, $As.MMP.bystry$, MMP и KL

	$a2_ \varphi_f(\bar{a}, b)$ – фазовременные характеристики							
факторы	$Rbar$	$Sact$	$Ap-ind$	$\beta-param$	$As.MM.medl$	$As.MMP.bystry$	MMP	KL
$Rbar$	1							
$Sact$	0.46	1						
$Ap-ind$	0.56	0.88	1					
$\beta-param$	0.56	0.75	0.88	1				
$As.MMP.medl$	0.55	-0.20	-0.09	-0.06	1			
$As.MMP.bystry$	0.89	0.23	0.44	0.50	0.64	1		
MMP	0.57	0.95	0.95	0.83	-0.13	0.37	1	
KL	-0.19	-0.09	-0.05	0.09	-0.33	-0.14	-0.05	1

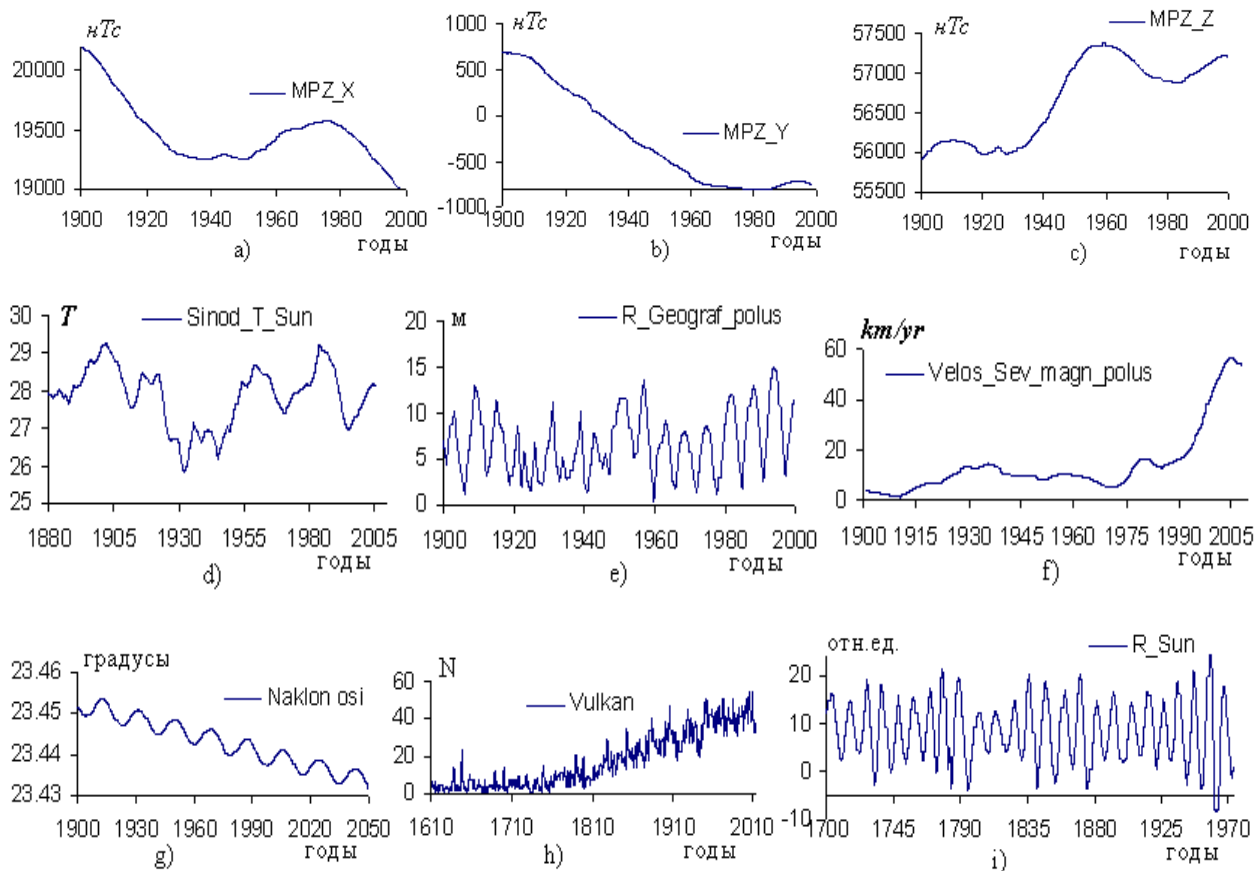
Примечание. Коэффициенты корреляций $r > |0.1|$ значимы с вероятностью 0.95 по критерию Стьюдента [26].

Эта группа переменных, как видно из графиков рисунка 4г и таблицы 5а линейных коэффициентов корреляций вейвлетных фазочастотных характеристик, значительно согласована с барицентрическим движением Солнца $Rbar$ с коэффициентом $k \geq 0.64$ и с изменениями солнечной активности $Sact$ с $k \geq 0.55$; проявляются отличия откликов медленных и быстрых составляющих коэффициентов асимметрий распределений азимутов межпланетного магнитного поля солнечного ветра на барицентрические движения Солнца и солнечной активности (более подвержены к изменениям хвостовые части высокоскоростных потоков СВ). Проявляется высокая отрицательная изменчивость интенсивности космических лучей на барицентрические движения Солнца с $k_1 = -0.76$ и с $k_2 = -0.67$ на изменения солнечной активности. Согласованность изменений этой группы переменных с барицентрическим дви-

жением Солнца и солнечной активностью проявляются и на графиках рисунка 4h и в таблице 5б фазовременных характеристик; результаты показывают, что на интенсивность космических лучей могут оказывать влияние и космические факторы.

Д. Характеристики изменений во времени расстояния центра масс Солнца от барицентра R_{bar} , солнечной активности S_{act} , пространственных элементов магнитного поля Земли по X, Y, Z , синодического периода вращения Солнца как звезды, дальности географического полюса Земли от международного начала координат, скорости изменения положения северного магнитного полюса, угла наклона оси вращения Земли, вулканических извержений и радиуса Солнца в относительных единицах в интервале времени 1900,7–1999 годы

На графиках рисунка 5j и 5k и в таблицах корреляций 6а и 6б приведены характеристики согласованностей изменений элементов X, Y, Z магнитного поля Земли MPZ_X, MPZ_Y, MPZ_Z , синодического периода вращения Солнца как звезды $Sinod_T_Sun$, дальности географического полюса от условного международного начала координат $R_geograf_polus$, скорости дрейфа северного магнитного полюса $Velos_sev_magn_polus$, наклона оси вращения Земли $Naklonosi$, вулканических извержений $Vulkan$ и радиуса Земли $R.Sun$ в относительных единицах и их вейвлетных фазочастотных и фазовременных характеристик с движениями Солнца относительно барицентра и солнечной активности в 1900.7–1999 годы.



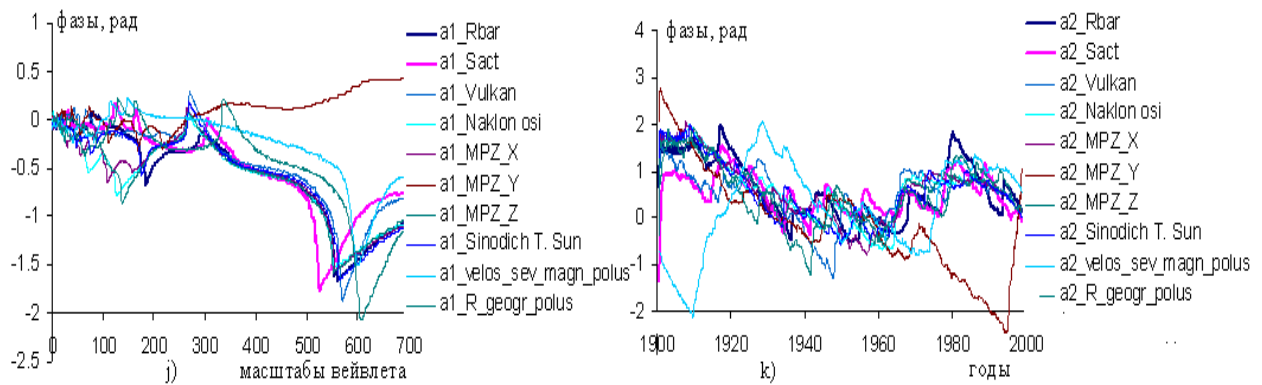


Рисунок 5. Графики изменений элементов X, Y, Z магнитного поля Земли а) MPZ_X , б) MPZ_Y , в) MPZ_Z [1], г) синодического периода вращения Солнца как звезды $Sinod.T.Sun$ [29], е) дальности географического полюса Земли от условного международного начала координат $R.geogr.pol.Zemly$, ф) скорости дрейфа северного магнитного полюса $velos.sever.magn.polus$ [1], г) угла наклона оси вращения Земли $Naklon.osi$ [19], ж) частоты извержений вулканов $Vulkan$ [30], отклонения радиуса Солнца в отн. ед. $R.Sun$ [1] и их вейвлетных j) фазочастотных $a1_{\varphi_f}(a, b)$ и к) фазовременных $a2_{\varphi_f}(\bar{a}, b)$ характеристик.

Таблица 6а

Линейные коэффициенты корреляций между вейвлетными фазочастотными характеристиками факторов: $Rbar$, $Sact$, $Vulkan$, $Naklon.osi$, $MPZ-X$, $MPZ-Y$, $MPZ-Z$ и $Sinod_T_Sun$, $velos.sev_magn_polus$, $R_geograf_polus$

	$a1_{\varphi_f}(a, b)$ – фазочастотные характеристики									
факторы	$Rbar$	$Sact$	$Vulkan$	$Naklon.osi$	$MPZ-X$	$MPZ-Y$	$MPZ-Z$	$Sinod.T_Sun$	$velos.sever.magn.polus$	$R.geogr.pol.Zemly$
$Rbar$	1									
$Sact$	0.87	1								
$Vulkan$	0.95	0.85	1							
$Naklon.osi$	0.90	0.79	0.93	1						
$MPZ-X$	0.94	0.80	0.95	0.98	1					
$MPZ-Y$	-0.77	-0.67	-0.76	-0.75	-0.76	1				
$MPZ-Z$	0.91	0.80	0.93	0.99	0.98	-0.73	1			
$Sinod.T_Sun$	0.97	0.83	0.97	0.95	0.97	-0.81	0.85	1		
$velos.sever.magn.polus$	0.85	0.69	0.84	0.82	0.84	-0.82	0.81	0.89	1	
$R.geogr.pol.Zemly$	0.85	0.67	0.78	0.70	0.81	-0.79	0.77	0.86	0.94	1

Таблица 6б

Линейные коэффициенты корреляций между вейвлетными фазовременными
характеристиками факторов: $Rbar$, $Sact$, $Vulkan$, $Naklon.osi$, $MPZ-X$, $MPZ-Y$, $MPZ-Z$ и
 $Sinod.T.Sun$, $velos.sev.magn.polus$, $R.geograf.polus$

	$a2_{-\varphi_f(a,\bar{b})}$ – фазовременные характеристики									
факторы	$Rbar$	$Sact$	$Vulkan$	$Naklon.osi$	$MPZ-X$	$MPZ-Y$	$MPZ-Z$	$Sinod.T_{Sun}$	$velos.sev.magn.polus$	$R.geogr.pol.Zemly$
$Rbar$	1									
$Sact$	0.75	1								
$Vulkan$	0.48	0.43	1							
$Naklon.osi$	0.76	0.55	0.67	1						
$MPZ-X$	0.81	0.51	0.62	0.92	1					
$MPZ-Y$	0.34	0.14	0.19	0.45	0.41	1				
$MPZ-Z$	0.79	0.59	0.67	0.97	0.92	0.45	1			
$Sinod.T_{Sun}$	0.78	0.54	0.68	0.90	0.93	0.42	0.92	1		
$velos.sev.magn.polus$	-0.19	0.01	-0.13	-0.34	-0.35	-0.58	-0.36	-0.39	1	
$R.geogr.pol.Zemly$	0.75	0.61	0.65	0.81	0.75	0.27	0.83	0.77	-0.36	1

Примечание. Коэффициенты корреляций $r > |0.1|$ значимы с вероятностью 0.95 по критерию Стьюдента [26].

Матрица 6 а) коэффициентов корреляций фазочастотных характеристик $a1_{-\varphi_f(a,\bar{b})}$ и графики изменений этих переменных на рисунке 5 j) характеризуют высокую согласованность изменений группы переменных с коэффициентом $k \geq |0.77|$ с движением Солнца относительно барицентра во всех частотных диапазонах сигналов, для которых $a < 700$. В интервале $104 \leq a \leq 233$ вейвлетного масштаба a наблюдаются четко выраженные изменения двух групп переменных в противофазе. В одну подгруппу входят изменения переменных магнитного поля $MPZ-X$, $MPZ-Z$ и угла наклона Земли $Naklon.osi$, а в другую подгруппу входят все другие переменные в группе, включая и изменения $Rbar$. Характерно то, что изменение переменной $MPZ-Y$ сильно согласовано с изменениями $Rbar$ с отрицательным знаком $k = -0.77$; значительно согласованы изменения всех переменных с изменениями $Rbar$ и между собой в фазочастотной области. Это объясняется тем, что изменения всех переменных в группе сильно согласованы с барицентрическими движениями Солнца. В графиках изменений фазовременных характеристик переменных, приведенных на рисунке 5 k) и в матрице корреляций 6 б), проявляется сильная взаимосогласованность изменений переменных за исключением составляющей Y магнитного поля Земли в интервале времени 1900–1942 годы и скорости изменений северного магнитного полюса Земли в интервале времени 1964–1999 годы с барицентрическим движением Солнца.

Проведены исследования, связанные с согласованностью отклонений радиуса Солнца в относительных единицах в интервале времени 1900–1972 годы [1] с движениями Солнца относительно барицентра и переменными, приведенными в матрицах 6. Получена высокая согласованность изменений отклонений радиуса Солнца R_{Sun} с его барицентрическими

движениями с $k = 0.92$ в фазочастотной области и с $k = 0.59$ в фазовременной области. Значительны корреляции изменений переменной R_Sun с изменениями других факторов, приведенных в матрице 6 а) с $k \geq 0.82$ в фазочастотной области и с $k \geq 0.42$ – в фазовременной области.

Е. Характеристики изменений во времени расстояния центра масс Солнца от ба-рицентра $Rbar$, солнечной активности $Sact$, ионосферных параметров f_min и $h'F$, межпланетного магнитного поля MMP и Ap – индекса активности магнитосферы Земли в интервале времени 1958.5–1994.9 годы

На рисунке 6 представлены графики изменений ионосферных параметров а) $f_min_ionosfery$ и б) $h'F_ionosfery$, характеризующих критическую минимальную частоту сигналов в МГц, наблюдаемых на ионограммах вертикального радиозондирования ионосферы, и минимально действующую высоту следа отражений O – компоненты сигналов в км и вейвлетных с) фазочастотных $a1_f(a,b)$ и д) фазовременных $a2_f(a,b)$ характеристик переменных $Rbar$, $Sact$, $f_min_ionosfery$, $h'F_ionosfery$, MMP и Ap_index .

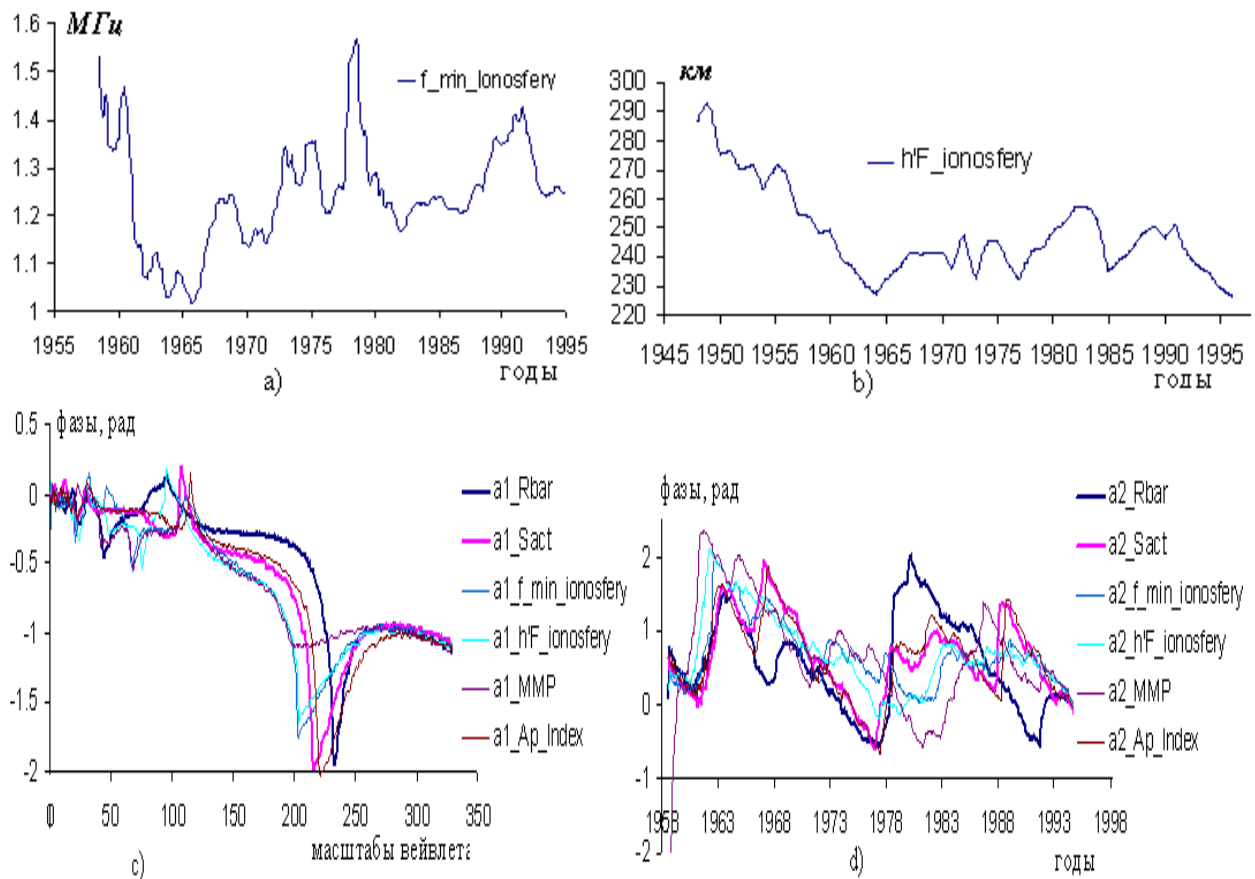


Рисунок 6. Графики изменений: а) вариаций ионосферных параметров $f_min_ionosfery$, б) $h'F_ionosfery$ [1], в) фазочастотных $a1_f(a,b)$ и д) фазовременных $a2_f(a,b)$ характеристик исследуемых переменных $Rbar$, $Sact$, f_min , $h'F$, $f_min_ionosfery$, $h'F_ionosfery$, MMP и Ap_index .

Таблица 7а

Линейные коэффициенты корреляций между вейвлетными фазочастотными характеристиками факторов: $Rbar$, $Sact$, $f_min_ionosfery$, $h'F_ionosfery$, MMP , SV_Sst , SV_R и Ap_index

	$a1_{\varphi_f}(a, \bar{b})$ – фазочастотные характеристики					
факторы	$Rbar$	$Sact$	$f.min$ $ionosfery$	$h'F$ $ionosfery$	MMP	Ap_index
$Rbar$	1					
$Sact$	0.83	1				
$f.min_ionosfery$	0.76	0.93	1			
$h'F_ionosfery$	0.81	0.93	0.98	1		
MMP	0.83	0.90	0.95	0.95	1	
Ap_index	0.90	0.97	0.88	0.89	0.88	1

Таблица 7б

Линейные коэффициенты корреляций между вейвлетными фазовременными характеристиками факторов: $Rbar$, $Sact$, $f_min_ionosfery$, $h'F_ionosfery$, MMP и Ap_index

	$a2_{\varphi_f}(a, \bar{b})$ – фазовременные характеристики					
факторы	$Rbar$	$Sact$	$f.min$ $ionosfery$	$h'F$ $ionosfery$	MMP	Ap_index
$Rbar$	1					
$Sact$	0.48	1				
$f.min_ionosfery$	0.12	0.65	1			
$h'F_ionosfery$	0.24	0.63	0.87	1		
MMP	-0.05	0.24	0.70	0.74	1	
Ap_index	0.56	0.92	0.59	0.61	0.17	1

Примечание. Коэффициенты корреляций $r > |0.1|$ значимы с вероятностью 0.95 по критерию Стьюдента [26].

Графики на рисунках 6с и 6д и таблицы корреляций 7а и 7б вейвлетных фазочастотных и фазовременных характеристик подчеркивают высокие статистические зависимости сложных нестационарных процессов, происходящих в ионосфере Земли с изменениями межпланетного магнитного поля MMP , индекса геомагнитной активности Земли $Ap - ind$, солнечной активности $Sact$ и барицентрических движений Солнца. На графиках рисунка 6с) и в таблице 7а фазочастотных характеристик проявляются высокие взаимосогласованные изменения переменных в группе с барицентрическим движением Солнца с $k \geq 0.76$. На графиках рисунка 6д и в таблице 7б фазовременных характеристик проявляются значительная согласованность изменений

ионосферных переменных с изменениями солнечной активности с $k \geq 0.63$ и изменений солнечной активности – с барицентрическим движением Солнца с $k = 0.48$.

Ж. Характеристики изменений во времени расстояния центра масс Солнца от барицентра, солнечной активности, среднегодовых значений межпланетного магнитного поля и его составляющих, частоты изменений магнитных бурь, напряженности общего магнитного поля Солнца, плотности потока плазмы, температуры плазмы солнечного ветра и скорости его изменения в интервале времени 1968.1–1997.2 годы

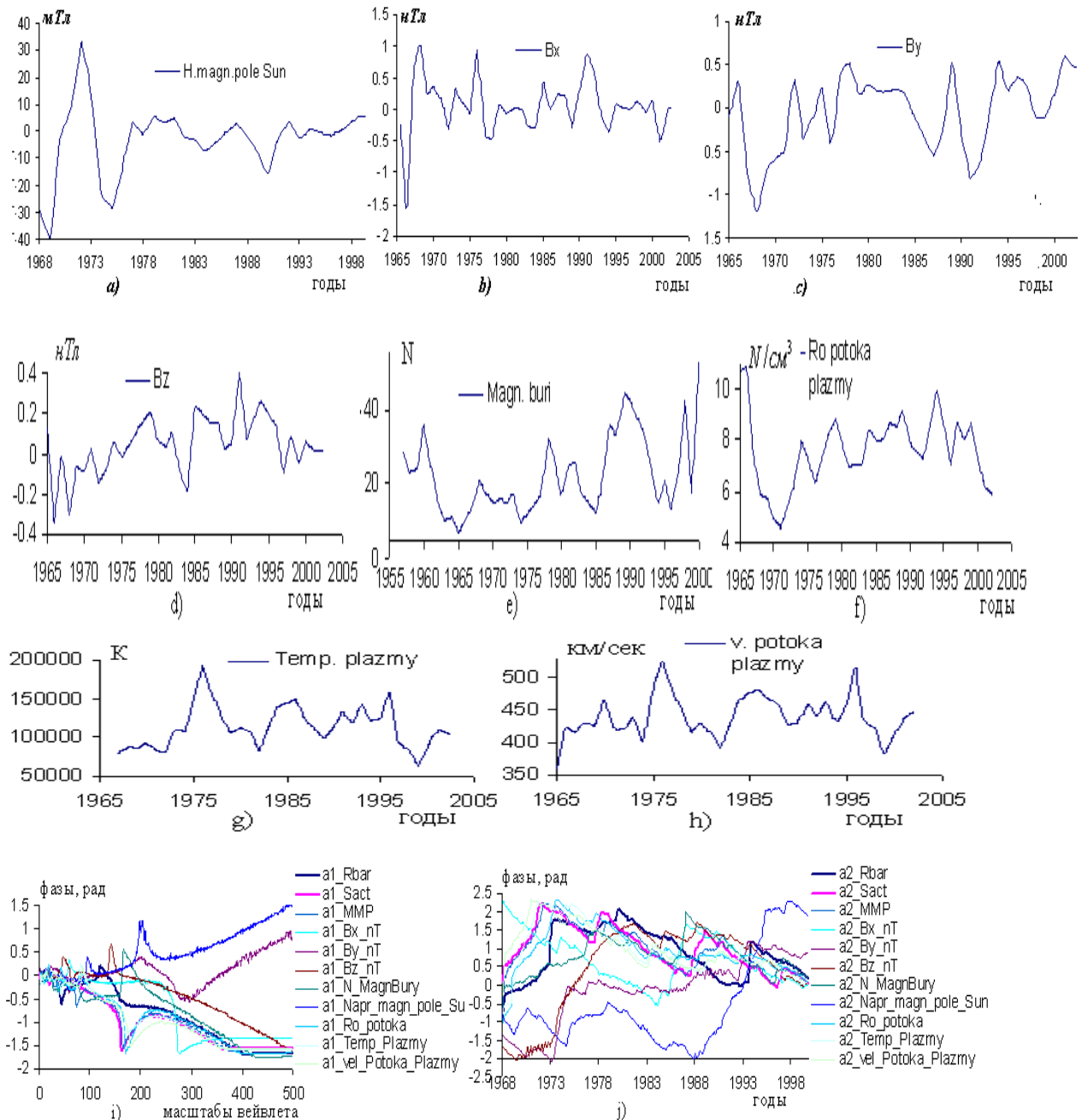


Рисунок 7. Графики изменений среднегодовых значений [1]: а) напряженности общего магнитного поля Солнца ($H.magn.pole_Sun$); б) – д) составляющих межпланетного магнитного поля Bx, By, Bz ; е) частоты магнитных бурь ($Magn.buri$), ф) плотности потока плазмы ($Ro.potoka\ plazmy$), г) температуры плазмы солнечного ветра ($Temp.plazmy$), h) скорости потока плазмы ($v.potoka\ plazmy$), и) фазочастотных $a1_ \varphi_f(a, \bar{b})$ и j) фазовременных $a2_ \varphi_f(a, b)$ характеристик гелиокосмических $Rbar, Sact$, магнитных переменных Солнца MMP, Bx, By, Bz , количества магнитных бурь $N.magnbury$, общей

*Применение вейвлетного фазового метода исследования сигналов
к анализу асимметричных барицентрических движений Солнца и
изменений процессов, происходящих на Солнце, околоземном
пространстве и в недрах Земли*

напряженности магнитного поля Солнца (*Napr.magn.pole.Sun*), плотности потока плазмы солнечного ветра (*Ro.potoka*), температуры плазмы (*Temp.plazmy*), скорости потока плазмы (*vel.PotokaPlazmy*)

В таблицах 8а и 8б приведены коэффициенты корреляций между вейвлетными и фазочастотными характеристиками указанных переменных.

Таблица 8а

	$a1_{-\varphi_f(a,\bar{b})}$ – фазочастотные характеристики										
факторы	<i>Rbar</i>	<i>Sact</i>	<i>MMP</i>	<i>Bx</i>	<i>By</i>	<i>Bz</i>	<i>M.bury</i>	<i>H.mag.pole.Sun</i>	<i>po.potoka.plazmy</i>	<i>Temp.plazmy</i>	<i>v.potoka.plazmy</i>
<i>Rbar</i>	1										
<i>Sact</i>	0.90	1									
<i>MMP</i>	0.92	0.99	1								
<i>Bx</i>	0.87	0.80	0.81	1							
<i>By</i>	-0.46	-0.41	-0.44	-0.13	1						
<i>Bz</i>	0.93	0.80	0.84	0.83	-0.58	1					
<i>M.bury</i>	0.87	0.72	0.75	0.85	-0.46	0.92	1				
<i>H.mag.pole.Sun</i>	-0.90	-0.82	-0.84	-0.73	0.68	-0.92	-0.83	1			
<i>po.potoka.plazmy</i>	0.93	0.97	0.98	0.79	-0.50	0.86	0.76	-0.87	1		
<i>Temp.plazmy</i>	0.94	0.98	0.98	0.84	-0.42	0.84	0.76	-0.86	0.98	1	
<i>v.potok.plazmy</i>	0.90	0.96	0.96	0.79	-0.40	0.80	0.71	-0.85	0.96	0.98	1

Таблица 8б

	$a2_{-\varphi_f(a,\bar{b})}$ – фазовременные характеристики										
факторы	<i>Rbar</i>	<i>Sact</i>	<i>MMP</i>	<i>Bx</i>	<i>By</i>	<i>Bz</i>	<i>M.bury</i>	<i>H.mag.pole.Sun</i>	<i>po.potoka.plazmy</i>	<i>Temp.plazmy</i>	<i>v.potoka.plazmy</i>
<i>Rbar</i>	1										
<i>Sact</i>	0.40	1									
<i>MMP</i>	0.47	0.95	1								
<i>Bx</i>	-0.55	0.21	0.09	1							
<i>By</i>	0.11	-0.56	-0.50	-0.51	1						
<i>Bz</i>	0.41	-0.21	-0.18	-0.52	0.72	1					
<i>M.bury</i>	0.36	0.25	0.20	-0.04	0.29	0.71	1				
<i>H.mag.pole.Sun</i>	-0.21	-0.53	-0.47	-0.38	0.56	-0.05	-0.43	1			

Продолжение таблицы 8б

$\rho_{\text{.potoka}}$.plazmy	0.72	0.75	0.82	-0.12	-0.15	0.10	0.35	-0.34	1		
Temp. plazmy	0.48	0.79	0.88	0.02	-0.40	-0.20	0.09	-0.35	0.88	1	
$v.\text{potok}$ plazmy	0.21	0.78	0.81	0.31	-0.71	-0.56	-0.16	-0.40	0.65	0.87	1

Примечание. Коэффициенты корреляций $r > |0.1|$ значимы с вероятностью 0.95 по критерию Стьюдента [26].

На графиках рисунков 7 i и 7j проявляется высокая согласованность многоэтапных взаимосвязанных изменений всей группы переменных с барицентрическим движением Солнца: солнечной активности, общей напряженности магнитного поля Солнца, межпланетного магнитного поля и его составляющих, других переменных в группе; проявляется изменение общей напряженности магнитного поля Солнца $H_{\text{mag.pole.Sun}}$ и составляющих B_x и B_y ММП в противофазе с изменениями других переменных в группе, нестационарность сложного процесса взаимодействия движений Солнца с изменениями солнечной активности и других переменных, сильно коррелирующих с изменениями солнечной активности. Характер относительных расположений кривых на рисунках 7i) и 7j) однозначно отображается в таблицах корреляций 8а) и 8б) – мер взаимосогласованных изменений переменных. Корреляции между переменными значительны в фазочастотной области.

Анализ взаимодействующих факторов в Солнечной системе

На рисунках графиков вейвлетных фазовых характеристик взаимодействующих между собой переменных (сигналов), приведенных в статье, отображаются усредненные значения изменяющихся мгновенных фаз по времени и масштабам вейвлета (частотам сигнала). Взаимодействие между факторами осуществляется гравитационными и термодинамическими силами, зависящими от изменений расстояний между планетами системы. На графиках вейвлетных преобразований $a1_{-\varphi_f(a,\bar{b})}$ и $a2_{-\varphi_f(\bar{a},b)}$ и в матрицах корреляций в группах исследуемых факторов отображаются меры их взаимодействий при заданных условиях вейвлетного преобразования (1) и временных интервалов наблюдений. Выбор совпадающих временных интервалов исследований в группах ограничивается интервалами их наблюдений.

На графиках вейвлетных фазочастотных характеристик переменных отображается главная закономерность изменений природных факторов, – частоты изменений взаимодействующих факторов происходят с той или иной согласованностью с изменениями движения Солнца относительно барицентра, – являются функциями времени, следовательно, имеют фазы. В научной литературе особенности изменений каждого природного или иного изменяющегося во времени фактора чаще всего представляются только набором Фурье-частот, спектральным составом, что недостаточно отражает характер изменений процессов в наблюдаемом интервале времени (пространстве) и взаимодействий между ними.

Вычислением частотных составов переменных, исследованных в статье, с использованием временных вейвлетных фазочастотных функций $\varphi(a,b)$ установлено, что в спектральных составах переменных содержатся выраженные периоды в интервалах $10 \div 12.5$ и $20 \div 22.4$ лет. Такие же периоды содержатся и в спектрах графиков функций: асимметричных движений Солнца вокруг центра масс (ЦМ) Солнечной системы $R_{\text{asimm.dv.Sun}}$ [8], расстояния от ЦМ Солнечной системы $R_{\text{Centr} - \text{Sun}}$, расстояния от ЦМ Солнечной системы до Зем-

ли $R.Centr-Zemly$ [28], изменений радиуса Солнца $Radius_Sun$ [1], синодического периода обращения Солнца как звезды $Sinod_T$ [29]. Представляет интерес вейвлетного анализа этих функций в комплексе с факторами $Rbar$ и $Sact$ в интервале времени 1878.7–1974.2 годы с целью установления согласованности изменений группы переменных с барицентрическими движениями Солнца, обусловленными движениями крупных планет Солнечной системы.

На графиках d и e рисунка 8 и в таблицах 9а и 9б представлены результаты сравнительных исследований.

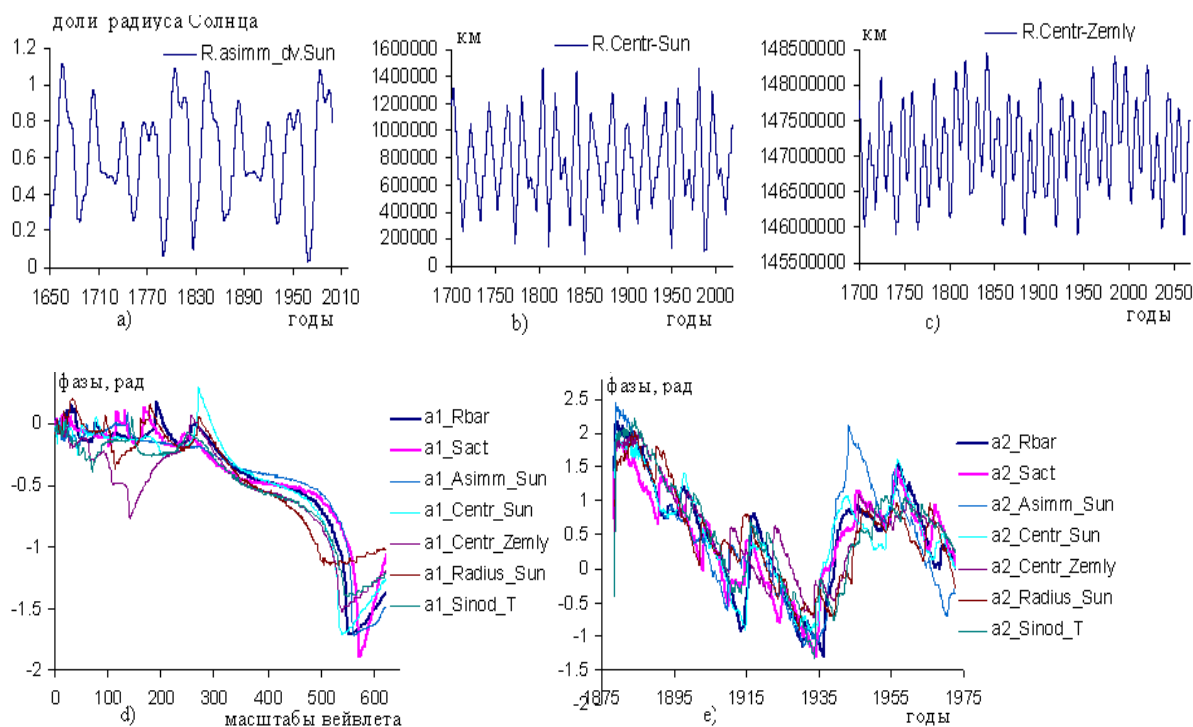


Рисунок 8. Графики изменений: а) расстояния центра масс (ЦМ) Солнечной системы (в долях солнечного радиуса) от точки (0.95; 0.00) в интервале времени 1650 – 2000 г.; б) расстояния от ЦМ Солнечной системы до Солнца в км в 1700 – 2018 гг, в) расстояния от ЦМ Солнечной системы до Земли в км в 1700 – 2068 г; д) и е) вейвлетные фазочастотные и фазовременные характеристики переменных $Rbar$, $Sact$, $Asimm_Sun$, $Centr.Sun$, $Centr.Zemly$, $Radius.Sun$ и $Sinod.T$ $a1_ \varphi_f(a, \bar{b})$.

Таблица 9а

Коэффициентов линейных корреляций фазочастотных характеристик переменных: $Rbar$, $Sact$, $Asimm.Sun$, $Centr.Sun$, $Centr.Zemly$, $Radius.Sun$, $Sinod.T$

	$a1_ \varphi_f(a, \bar{b})$ – фазочастотные характеристики						
факторы	$Rbar$	$Sact$	$Asimm.Sun$	$Centr.Sun$	$Centr.Zemly$	$Radius.Sun$	$Sinod.T$
$Rbar$	1						
$Sact$	0.96	1					
$Asimm.Sun$	0.97	0.96	1				
$Centr.Sun$	0.97	0.91	0.92	1			
$Centr.Zemly$	0.93	0.87	0.88	0.96	1		
$Radius.Sun$	0.90	0.87	0.83	0.92	0.90	1	
$Sinod.T$	0.98	0.94	0.94	0.98	0.94	0.93	1

Коэффициентов линейных корреляций фазовременных характеристик переменных:
 $Rbar$, $Sact$, $Asymm.Sun$, $Centr.Sun$, $Centr.Zemly$, $Radius.Sun$, $Sinod.T$

	$a2_ \varphi_f(a, \bar{b})$ – фазовременные характеристики						
факторы	$Rbar$	$Sact$	$Asymm.Sun$	$Centr.Sun$	$Centr.Zemly$	$Radius.Sun$	$Sinod.T$
$Rbar$	1						
$Sact$	0.89	1					
$Asymm.Sun$	0.87	0.84	1				
$Centr.Sun$	0.95	0.89	0.84	1			
$Centr.Zemly$	0.82	0.82	0.73	0.76	1		
$Radius.Sun$	0.80	0.84	0.73	0.73	0.89	1	
$Sinod.T$	0.88	0.85	0.71	0.83	0.91	0.90	1

Примечание. Коэффициенты корреляций $r > |0.1|$ значимы с вероятностью 0.95 по критерию Стьюдента [Кремер, 2018].

Графики на рисунках 8 и первые столбики в таблицах корреляций 9а и 9б характеризуют высокую согласованность изменений группы переменных с движением Солнца относительно барицентра как в фазочастотных с $k \geq 0.90$, так и в фазовременных координатах с $k \geq 0.80$. Значительны коэффициенты взаимных корреляций и между вейвлетными преобразованиями $a1_ \varphi_f(a, \bar{b})$ с $k \geq 0.83$ и $a2_ \varphi_f(a, \bar{b})$ с $k \geq 0.71$. Это означает, что движения (изменения) всех переменных в группе обусловлены изменениями со временем расстояния центра масс Солнца от барицентра, гравитационными силами Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна и характерный ≈ 11 –годовой цикл солнечной активности, скорее всего, индуцирован барицентрическим движением Солнца. Заметим, что в спектральном составе изменений переменной $Rbar$ содержатся (7.6, 9.9, 12.8, 20, 35.7, 46.6, 174.6) годовые периоды, отмеченные также в работе [5]. В работе [18] обсуждается обусловленность солнечной активности с термоядерными процессами в недрах Солнца. Результаты исследований свидетельствуют об участии движений крупных планет Солнечной системы в управлении термодинамическим процессом в недрах Солнца.

КРАТКОЕ ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Согласованность изменений исследуемых групп переменных с барицентрическими движениями Солнца отображается на двух типах графиков вейвлетных преобразований: фазочастотном и фазовременном и двумя матрицами корреляций этих преобразований. Графики фазочастотных характеристик переменных условно можно разделить на две части: высоко- и низкочастотные. Они отличаются разной согласованностью изменений переменных в двух фазочастотных областях.

Частотный состав графиков фазочастотных характеристик, соответственно, и значения коэффициентов корреляций в матрицах определяются частотным составом исходных переменных, интервалами наблюдений за переменными и задаваемым исследователем масштаба вейвлета. Задаваемый масштаб a вейвлета должен охватить полный набор частот исследуемой функции, временного ряда; выбор вейвлетного масштаба a для исследования конкретного наблюдения $f(t)$ можно установить вычислением и построением графика преобразования $a1_ \varphi_f(a, \bar{b})$.

1. Основным результатом выполненной работы является то, что установлена причина ранее известных и изучаемых возмущений в системе солнечно-земных связей, проявлений солнечной активности с $T \approx 11$ -годовой периодичностью. Таковым является барицентрическое движение Солнца, обусловленное влиянием Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна.

2. Результатом таких движений Солнца являются квазипериодические изменения солнечной активности и сопровождающие этот сложный процесс электромагнитные потоки, солнечные пятна и факелы на полюсах Солнца, межпланетного магнитного поля, солнечного ветра, магнитных бурь.

3. Изменяющиеся электромагнитные процессы межпланетного пространства сопровождаются изменениями магнитосферы Земли, ее магнитных напряженностей, характеристик ионосферы.

4. С барицентрическим движением Солнца согласованы не только процессы солнечной активности и межпланетного пространства, но и вулканическая деятельность Земли, изменения наклона оси вращения Земли, изменения радиуса Солнца в относительных единицах и синодического периода Солнца. Скорее всего, циклические проявления солнечной активности являются признаком согласованности термоядерных процессов в недрах Солнца с ее барицентрическим движением.

5. Результатом изменений солнечно-земных связей, обусловленных барицентрическим движением Солнца, является и изменение климата на Земле, геофизических процессов.

6. Перечисленные выше результаты стали возможными благодаря использованию в обработке сигналов вейвлетного преобразования с комплексным вейвлетом с последующим вычислением их фазочастотных и фазовременных характеристик, матриц корреляций характеристик и анализом результатов в совокупности.

Литература

1. Кокоуров, В. Д. Многолетние изменения в системе Солнце – Земля / В. Д. Кокоуров. – Текст : электронный // Солнечно-земная физика. ИСЗФ СО РАН. – URL: <http://rcrc2016.msu.ru/irkutsk/kok/changes.htm> (Дата обращения: 10.04.2020).
2. Joze, P. D. Sun's motion and sunspots / P. D. Joze // Aston Journal. – 1965. – Vol. 70, № 3. – P. 193–200.
3. Khlystov, A. I. Barycentric movement of the Sun and Solar-Terrestrial rotation / A. I. Khlystov, V. P. Dolgachev, L. M. Domozhilova // Biophysics. – 1992. – Vol. 37, № 3. – P. 455–460.
4. Хлыстов, А. И. Когда просыпаются вулканы Марса? / А. И. Хлыстов. – Текст : непосредственный // Техника – молодежи. – 2004. – № 4. – С. 10–14.
5. Хлыстов, А. И. Резонанс третьего рода в Солнечной системе / А. И. Хлыстов, Р. К. Клиге, Н. С. Сидоренко. – Текст : непосредственный // Современные глобальные изменения природной среды : Т. 3. Факторы глобальных изменений. – Москва : Научный мир, 2012. – С. 147–160.
6. Хлыстов, А. И. Нелинейный метод прогноза 24-го солнечного цикла / А. И. Хлыстов, Б. В. Сомов. – Текст : непосредственный // Современные глобальные изменения природной среды : Т. 3. Факторы глобальных изменений. – Москва : Научный мир, 2012. – С. 137–146.
7. Прокудина, В. С. Анализ возможных причин продолжительного минимума 24 цикла / В. С. Прокудина. – Текст : непосредственный // Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца. Солнечная и солнечно-земная физика (Пулково, 3 – 7 октября). – Санкт-Петербург, 2011. – С. 81–84.
8. Вильсон Ян Р. Г. Изменение во вращении Земли относительно барицентра и климатический эффект / Р. Г. Вильсон Ян. – Текст : непосредственный // Современные глобальные изменения природной среды : Т. 3. Факторы глобальных изменений. – Москва : Научный мир. – 2012. – С. 78–102.
9. Perryman, M. A. C. The barycentric motion of exoplanet host stars. Tests of solar spin-orbit coupling / M. A. C. Perryman, T. Schulze-Hartung // Astronomy and Astrophysics manuscript. – 2010. – October 6. – P. 15668–15674.

10. Javaraiah, J. Sun's retrograde motion and violation of even-odd cycle rule in sunspot activity / J. Javaraiah // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2005. – Vol. 362. – P. 1311–1318.
11. Mackey, R. Rhodes Fairbridge and the idea that the solar system regulates the Earth's climate / R. Mackey // *Journal of Coastal Research*. – 2007. – Issue 50. – P. 955–968.
12. Landscheidt, T. Beziehungen zwischen der Sonnenaktivität und dem Massenzentrum des Sonnensystems // *Nachr. D. Olbersgesellschaft Bremen*. – 1976. – Vol. 100. – P. 3–19.
13. Landscheidt, T. Solar oscillations, sunspot cycles, and climatic change / T. Landscheidt // *Weather and climate responses to solar variations* / editor B. M. McCormac. – Boulder : Associated Univ. Press, 1983. – P. 293–308.
14. Landscheidt, T. Klimavorhersage mit astronomischen Mitteln? / T. Landscheidt // *Aus Fusion*. – 1997. Vol. 1. – P. 58.
15. Landscheidt Cycles Research. – URL: <http://landscheidt.wordpress.com> (Date of request: 15.09.2020).
16. Charvatova, I. On the relation between solar motion and the solar activity in the years 1700–80 and 191–60 a.d. / I. Charvatova // *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*. – 1990. – Vol. 4, № 3. – P. 200–204.
17. Лукьянов, Л. Г. Лекции по небесной механике : учебное пособие для вузов / Л. Г. Лукьянов, Г. И. Ширмин. – Алматы, 2009. – 227 с. – Текст : непосредственный.
18. Mahmoud, E. Yousif. The Solar Flare Mechanism / E. Mahmoud // *Physics Department - The University of Nairobi*. – 2011. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/215870630> (Дата обращения: 20.03.2020).
19. Федоров, В. М. Тенденции и причины изменений глобального климата Земли в современную эпоху / В. М. Федоров. – Москва : КДУ : Добросвет, 2018. – URL: <https://bookonline.ru/product/tendencii-i-prichiny-izmeneniy-globalnogo-klimata-zemli-v-sovremennuyu-epokhu> (Дата обращения: 15.07.2020). – Текст : электронный.
20. Гусева, С. А. К описанию крупномасштабного полярного магнитного потока Солнца / С. А. Гусева, Ю. А. Наговицин. – Текст : непосредственный // *Труды XI Пулковской Международной конференции по физике Солнца, 2-7 июля 2007 г. Пулково*. – Санкт-Петербург, 2007. – С. 127–130.
21. Жеребцов, Г. А. Комплекс гелиогеофизических инструментов нового поколения / Г. А. Жеребцов. – DOI:10.12737/szf-62202001. – Текст : непосредственный // *Солнечно-земная физика*. – 2020. – Т. 6, № 2. – С. 6–18.
22. Алексеев, В. И. Исследование изменений глобального климата как сложной системы с использованием вейвлетных фазочастотных функций, фазочастотных и фазовременных характеристик гелиокосмических и климатических переменных. Часть 1. / В. И. Алексеев. – Текст : непосредственный // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331, № 7. – С. 238–250.
23. Алексеев, В. И. Программный комплекс для вейвлетной обработки временных рядов (сигналов) и визуализации результатов в Matlab и Surfer : свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ : № 2019663399 : дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 16.10.2019. – Москва, 2019. – Текст : непосредственный.
24. Дьяконов, В. П. Вейвлеты. От теории к практике / В. П. Дьяконов. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2004. – 400 с. – ISBN 5-93455-150-7. – Текст : непосредственный.
25. Абдусаматов, Х. И. Солнце диктует климат Земли / Х. И. Абдусаматов. – Санкт-Петербург : Logos, 2009. – 197 с. – ISBN 978-5-87278-386-9. – Текст : непосредственный.

26. Кремер, Н. Ш. Математическая статистика : учебник и практикум / Н. Ш. Кремер. – Москва : ЮРАЙТ, 2018. – 259 с. – ISBN 978-5-534-01654-3. – Текст : непосредственный.
27. Зотов, О. Д. Влияние параметра β солнечного ветра на статистические характеристики A_p –индекса в цикле солнечной активности / О. Д. Зотов, Б. И. Клейн, Н. А. Куражковский. – DOI:10.12737/szf-54201906. – Текст : непосредственный // Солнечно-земная физика. – 2019. – Т. 5, № 4. – С. 55–63.
28. Федулов, К. В. Структура климатических изменений (по палеоданным и данным инструментальной эпохи) / К. В. Федулов, Н. М. Астафьева. – Москва : ИКИ РАН, 2008. – 60 с. – Текст : непосредственный.
29. Бадалян, О. Г. Скорость вращения Солнца как звезды на большом интервале времени / О. Г. Бадалян. – Текст : непосредственный // Труды всероссийской конференции по физике Земли. Солнечная и солнечно-земная физика, Пулково, 3 – 7 октября 2011. – Санкт-Петербург, 2011. – С. 15–18.
30. *Volkano eruptions of 2014 and all eruptions since 1600 to present // The Big Wobble. – 18 June 2016. – URL: <http://www.thebigwobble.org/2016/06/volcano-eruptions-of-2014-and-all.html> (Date of request: 20.11.2019).*
31. Ерофеев, Д. В. Влияние крупномасштабной неоднородности скорости солнечного ветра на распределение направлений вектора межпланетного магнитного поля / Д. В. Ерофеев. – Текст : непосредственный // Солнечно-земная физика. – 2019. – Т. 5, № 3. – С. 50–63.
32. Филиппов, Б. П. Эруптивные процессы на Солнце / Б. П. Филиппов. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 216 с. – Текст : непосредственный.