

В. И. Алексеев

**ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЙ
ЯВЛЕНИЯ ЭЛЬ-НИНЬО – ЛА-НИНЬЯ И ЕГО ПРОГНОЗИРОВАНИЕ**

Вычислением частотного состава солнечной постоянной, солнечной активности по временным рядам в 1610–2012 годы, кривой Эль-Ниньо в 1470–1984 и 1950–2050 гг. установлено, что частотный состав кривой индекса Эль-Ниньо – Ла-Нинья индуцируется частотными составами солнечных переменных. Частотные составы переменных вычислены построением их вейвлетных фазо-частотных характеристик.

Вычислены разности мгновенных фаз кривых солнечных переменных, $CO_2(t)$ глобальной приземной температуры воздуха $^{\circ}T(t)$, кривой Эль-Ниньо в двух интервалах времени, в 1891–1950 и 1950–2009 гг.; получены линейные аппроксимации с коэффициентами k разностей мгновенных фаз между переменными в этих интервалах времени. Анализом отношений коэффициентов аппроксимаций k_2/k_1 в двух интервалах времени установлены значительные влияния изменений солнечных переменных, $CO_2(t)$ на рост приземной температуры воздуха и Эль-Ниньо, влияние роста приземной температуры воздуха на рост Эль-Ниньо в 1950–2009 годы в глобальных климатических изменениях. Получены кривые прогнозированной Эль-Ниньо с 2015/16 по 2050 годы по обученным данным кривой в 1950–2015/16 годы в двух вариантах как суммы спрогнозированных вейвлетных аппроксимирующих и детализирующих составляющих исходного сигнала по правилу Малла. Достоверность прогностических значений кривой явления Эль-Ниньо составляет $\approx 83\%$. На полученных кривых координаты локальных максимумов и минимумов почти совпадают. Изображение вейвлетной фазо-частотной характеристики одной кривой отражает влияние на изменение явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья в прошлом и в будущем солнечных и климатических переменных Земли.

Ключевые слова: явление Эль-Ниньо – Ла-Нинья, солнечная активность, солнечная постоянная, мгновенные фазы сигналов, разности мгновенных фаз, линейные аппроксимации разностей мгновенных фаз, прогнозирование вейвлетных деталей сигналов, правило Мала композиции сигнала.

V. I. Alekseev

**WAVELET ANALYSIS OF THE EL NIÑO – LA NIÑA PHENOMENON
DYNAMICS AND ITS FORECASTING**

Having calculated the frequency content of a solar constant, solar activity from the time series in (1610–2012), the El Niño curve in both (1470–1984) and (1950–2075), it has been found that the frequency content of an El Niño – La Niña curve is induced by frequency contents of solar variables. The frequency contents of the variables have been calculated by developing their wavelet phase-frequency responses.

Instantaneous phase differences of the solar variables curves $CO_2(t)$, global surface air temperature $^{\circ}T(t)$, El Niño in the two time intervals, in (1891–1950) and (1950–2009), have been calculated; linear approximations with coefficients k of instantaneous phase differences between variables in these time intervals have been obtained. Based on relational approximation coefficient analysis k_2/k_1 of the two time intervals, it has been identified that rising surface air temperature and El Niño alike had been markedly influenced by solar variables variations $CO_2(t)$ during the first time

interval, with the El Niño rise being affected by that of the surface air temperature amid the global climate change in 1950–2009.

The predicted El Niño curves have been obtained from the 2015/16 to 2050 time period by the trained data curve in 1950–2015/16 in two versions as the sum of predicted wavelet approximating and detailing components of the original signal according to the Mallat rule. The accuracy of the predictive El Niño curve values is $\approx 83\%$. On the obtained curves, coordinates of local maximum and minimum are nearly matching. Wavelet phase-frequency response imaging of one curve reflects an impact on El Niño – La Niña variations of the Earth's solar and climatic variables in the past and the future alike.

Key words: El Niño – La Niña phenomenon, solar activity, solar constant, instantaneous signal phase, instantaneous phase differences, linear approximations of instantaneous phase differences, wavelet detail signal forecasting, Mallat rule.

Введение

Феномен аномального явления Эль-Ниньо заключается в резком циклическом повышении температуры (на 5–9 °C) поверхностного слоя воды на востоке Тихого океана (в тропической и центральной частях) на площади порядка 10 миллионов кв. км [15]. Глубина этого тёплого пласта воды достигает 100–200 метров и сопровождается изменением направления ветра в тропосфере над Тихим океаном, смещением зон конвекции и осадков. В некоторых случаях возникает аномалия противоположного знака – явление Ла-Нинья, которое характеризуется отрицательными аномалиями температуры океана на востоке и в центре Тихого океана и более сильными пассатными ветрами вдоль экватора. Явление Эль-Ниньо и связанные с ним процессы повторяются, как пишут в литературе, с интервалом от 2 до 7–10 лет и может продолжаться от нескольких месяцев до 1,5 лет. Эль-Ниньо может быть сильным или слабым. Сильный Эль-Ниньо временно нарушает привычные погодные условия во всем мире. Обычно действие этого феномена приводит к тому, что некоторые регионы становятся более влажными, другие – более сухими. Из-за этих изменений некоторые страны терпят серьезный экологический и эпидемиологический ущерб.

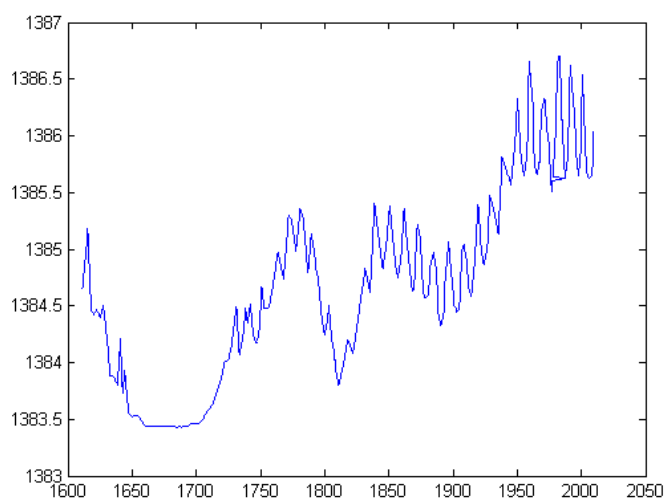
Описание явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья приводится во многих работах [15;16]. Это грозное явление порождается Природой, существованием системы Космос – Солнце – атмосфера_Земли – Земля. В этой системе элемент Космос – Солнце обеспечивают поверхность Земли переменнo изменяющейся энергией, а элемент атмосфера_Земли – Земля перераспределяет полученную земной поверхностью энергию в пространстве путем коллективного взаимодействия элементов атмосферы, гидросферы и суши Земли, а также биосферы. По этой причине природное явление Эль-Ниньо – Ла-Нинья можно назвать самоорганизующейся диссипативной структурой [3]. Закономерность изменения этой структуры подчиняется динамическим законам нестационарных случайных процессов и полей.

Представляет интерес изучение количественной взаимосвязи изменений солнечной постоянной $S_{const}(t)$, солнечной активности $S_{act}(t)$, глобальной температуры ${}^0T(t)$ и явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья до и после 1950 года. Весьма актуально прогнозирование этого грозного явления на некоторый временной горизонт будущего.

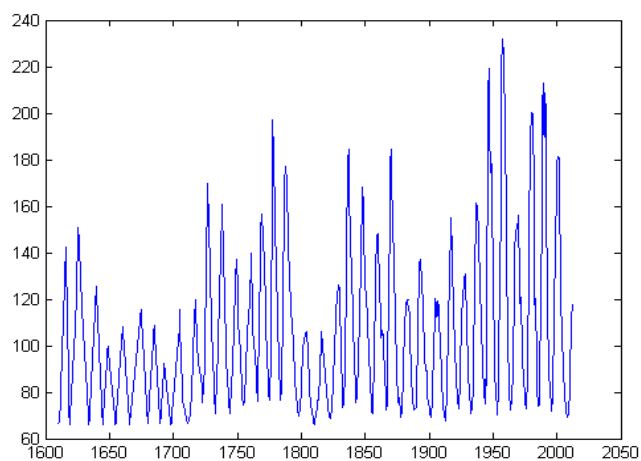
Объекты и методы исследований

Для проведения исследований использованы кривые изменений солнечной постоянной $S_{const}(t)$, солнечной активности $S_{act}(t)$, взятые из [16], кривая изменений глобальной температуры ${}^0T(t)$ [13] и кривая изменений Эль-Ниньо [14], обозначенный далее как $\eta(t)$. Графики изменений перечисленных выше переменных представлены на рисунке 1. Графики изменений переменных оцифрованы и использованы для исследований. Исследованиями установлены, что законы распределений этих переменных не симметричны с несколькими

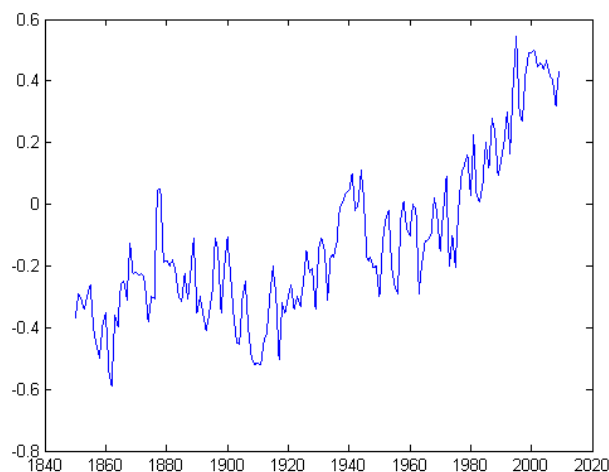
горбиками, отличаются от распределения Гаусса. Это является характеристикой того, что на изменчивость этих переменных влияют несколько существенных независимых друг от друга факторов. На рисунке 2 представлен фазовый портрет изменения функции Эль-Ниньо на плоскости $(\eta(t), \eta'(t) \approx \eta(t) - \eta(t-1))$. Особенностью этого фазового портрета, отображающего информацию о совместном поведении реализаций $\eta(t)$ и $\eta'(t)$ является то, что: а) они не коррелированы; б) дисперсия производной $\sigma_{\eta'}^2$ зависит от значений исследуемого процесса $\eta(t)$ (относительное отклонение производной $\eta'(t)$ от ее математического ожидания растет с ростом значений $\eta(t)$ самого процесса) [1]. Это означает, что рассматриваемый процесс $\eta(t)$ не относится к классу случайных процессов со стохастически независимой производной, и рост интенсивности проявления Эль-Ниньо – Ла-Нинья приводит к росту влияния этого случайного процесса в регионе, к росту флуктуации глобального климата и региональных климатических изменений.



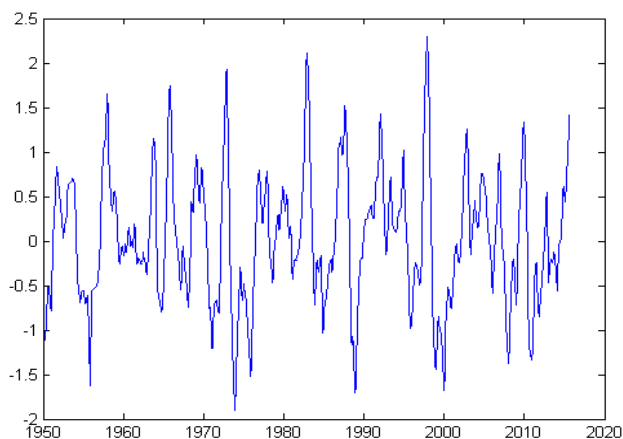
а) график изменений солнечной постоянной в $Вт / м^2$ (по ординате) в интервале времени (1610–2010 гг.) (по абсциссе)



б) график изменений солнечной активности, числа солнечных пятен (по ординате), в интервале времени (1610–2010 гг.) (по абсциссе)



в) график изменений глобальной приземной температуры воздуха в градусах Цельсия относительно (1961–1990 гг.) – по ординате в 1850–2009 гг. – по абсциссе



г) график изменения индекса Эль-Ниньо (средней температуры поверхности экваториальной части Тихого океана (SST) в $^{\circ}\text{C}$ (по ординате) в 1950–2015 годы

Рисунок 1 – Графики изменений солнечных (солнечной постоянной и солнечной активности) и климатических переменных (аномалии глобальной температуры и индекса Эль-Ниньо)

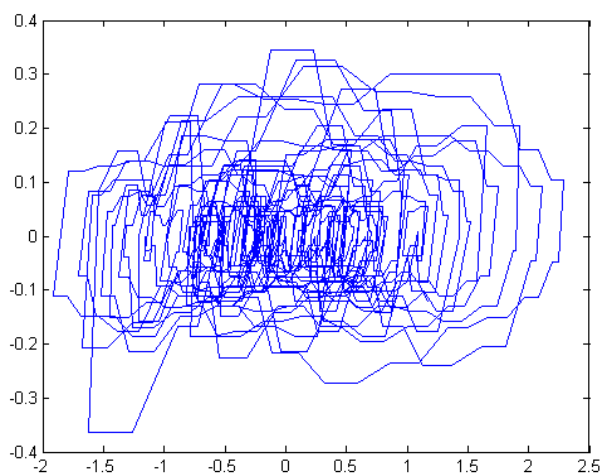


Рисунок 2 – Фазовая траектория $L(\eta, \eta'; t)$ случайного процесса $\eta(t)$ – реализации кривой Эль-Ниньо в интервале времени (1950–2015 гг.) (по абсциссе) и $\eta'(t) \approx \eta(t) - \eta(t-1)$ (по ординате)

Зависимость периодических проявлений Эль-Ниньо при изменениях солнечной активности описывается в работах [11; 12], установленная также с использованием непрерывного вейвлет-преобразования.

В работе используются следующие вейвлетные методы исследований: вычисление мгновенных фаз переменных, построение фазо-частотных характеристик [6]. Прогнозирование сложных функций производится вейвлетным многомасштабным разложением функций на более простые аппроксимирующие и детализирующие составляющие с последующим их прогнозированием с использованием нечетких нейронных сетей [8]. Восстановление прогнозированного сигнала производится с использованием метода Малла [10] композиции сигнала из вейвлетных аппроксимирующей и детализирующих составляющих. Вычисление мгновенной фазы $\varphi(t)$ сигнала $f(t)$ производится по формулам [2]:

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

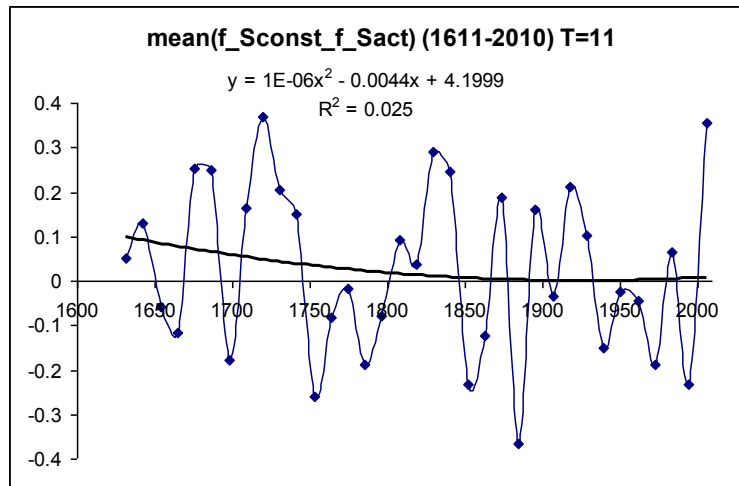
$\varphi(t) = \arctg\left[\frac{\text{Im}(Wf(a, b))}{\text{Re}(Wf(a, b))}\right]$, где $\text{Im}(W(f(a, b)))$, $\text{Re}(W(f(a, b)))$ – мнимая и вещественная составляющие комплекснозначной матрицы $Wf(a, b)$ размерности $(1 : N)$ (N – число дискретных отсчетов сигнала $f(t)$) в исследуемом временном интервале. В формуле (1) функция $\overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}$ – комплексно-сопряженный вейвлет с параметрами a и b , где a – задает масштаб вейвлета, b – параметр сдвига на временной оси (в вычислениях $a = 1$, b изменяется в интервале $1 : N$).

Изложение результатов и их анализ

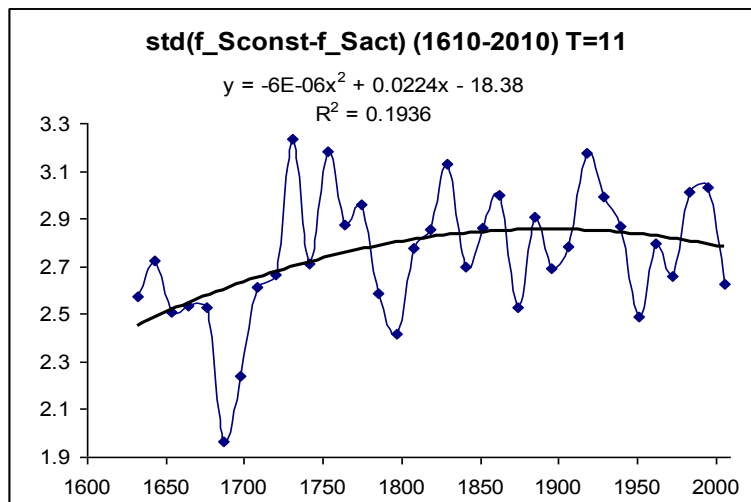
На рисунке 3 представлены графики изменений «скользящего» среднего ($mean$) и «скользящего» стандартного отклонения (std) кривой запаздывания по фазе солнечной активности относительно изменений солнечной постоянной, т. е. функции $y(t) = f - S_{const}(t) - f - S_{act}(t)$ в интервале времени в 1610–2010 годы с окном усреднения $T = 11$ лет (111 отсчетов на временной оси). Мгновенные фазы $f - S_{const}(t)$, $f - S_{act}(t)$ изменений солнечной постоянной и солнечной активности вычисляются с использованием графиков а) и б) этих кривых, приведенных на рисунке 1, и одномерного непрерывного вейвлет-преобразования [Дьяконов, 2004]. Функция $y(t)$ – циклическая, в которой опережение роста солнечной постоянной $S_{const}(t)$ меняется опережением роста солнечной активности $S_{act}(t)$. В исследованном временном интервале (1610–2010 гг.) рост солнечной постоянной опережает рост солнечной активности в среднем с параметрами: $m_y = 0.031$, $\sigma_y = 2.78$ радиан. Относительные изменения функций $f - S_{act}(t)$ и $f - S_{const}(t)$ хорошо видны на рисунках 2а и 2б скользящих средних $mean(y(t))$ и $std(y(t))$. Линейная аппроксимация циклически изменяющейся функции $y(t)$ описывается формулой $y(t) = -0.0002 \cdot t + 0.41$, которая отражает тенденцию опережения роста солнечной активности по сравнению с ростом солнечной постоянной со скоростью 0.0002 радиан в год в исследуемом интервале времени.

На графиках рисунка 3 выделяются известные аномально холодные временные интервалы в окрестностях точек (1700, 1800 и 1900 гг.) [15], а также аномально теплые интервалы времени в окрестностях (1925–1926, 1982–1983, 1997–1998 гг.) на графике рисунка 1в. На рисунке 3 аномально холодным интервалам времени соответствуют минимальные значения

графиков $mean$ и std , а аномально теплым – превышения графиков $mean(t)$ и $std(t)$ аппроксимирующих линий.



а) график «скользящей» средней $mean$ функции $y(t)$ в интервале времени (1610–2010 гг.)



б) график «скользящего» стандартного отклонения std функции $y(t)$ в интервале времени (1610–2010 гг.)

Рисунок 3 – Графики изменений «скользящих» средних $mean(t)$ и $std(t)$ функции $y(t) = f_{-S_{const}}(t) - f_{-S_{act}}(t)$ запаздывания по фазе солнечной активности относительно изменений солнечной постоянной в радианах (по ординате) в интервале времени (1610–2010 гг.) (по абсциссе) с окном усреднения 11 лет (111 отсчетов) и их квадратичные аппроксимации

Исследованы закономерности запаздываний по фазе солнечной постоянной $S_{const}(t)$, солнечной активности $S_{act}(t)$, глобальной приземной температуры воздуха ${}^0T(t)$ и парникового газа $CO_2(t)$ относительно Эль-Ниньо и относительно друг друга в последовательно равных интервалах времени (1891–1950 гг.) и (1950–2009 гг.). В таблице 1 приведены линейные уравнения аппроксимаций запаздываний мгновенных фаз переменных: $f_{-S_{act}}(t)$, $f_{-S_{const}}(t)$, $f_{-El-Nino}(t)$, $f_{-{}^0T}(t)$ и $f_{-CO_2}(t)$ относительно друг друга в двух интервалах времени, в (1891–1950) и (1950–2009) годы, обозначенные как $y_i^1(t) = apr(f_{-\varphi_1}(t) - f_{-\varphi_2}(t))$ и $y_i^2(t) = apr(f_{-\varphi_1}(t) - f_{-\varphi_2}(t))$, где $i = 1, 2, \dots, 8$ – номера разностей мгновенных фаз переменных в таблице 1.

Таблица 1 – Линейные уравнения аппроксимаций запаздываний переменных по фазе, отношений коэффициентов k_2 / k_1 и их статистические характеристики в радианах в интервалах времени в (1950–2009 гг.) и (1891–1950 гг.)

Уравнения аппроксимаций запаздываний переменных по фазе	k_2 / k_1	$mean, rad$	std, rad
$y_1^2(t) = apr(f_{-}S_{act}(t) - f_{-}S_{const}(t)) = 0.0007 \cdot t - 1.29$ $y_1^1(t) = apr(f_{-}S_{act}(t) - f_{-}S_{const}(t)) = 0.0032 \cdot t - 6.18$	0.22	0.07 –0.04	2.92 2.85
$y_2^2(t) = apr(f_{-}S_{const}(t) - f_{-}El_{-}Nino) = 0.0027 \cdot t - 5.42$ $y_2^1(t) = apr(f_{-}El_{-}Nino(t) - f_{-}S_{const}(t)) = 0.0008 \cdot t - 1.50$	3.38	–0.10 –0.02	2.63 2.60
$y_3^2(t) = apr(f_{-}S_{act}(t) - f_{-}El_{-}Nino) = 0.0034 \cdot t - 6.70$ $y_3^1(t) = apr(f_{-}S_{act}(t) - f_{-}El_{-}Nino(t)) = 0.0024 \cdot t - 4.67$	1.42	–0.03 –0.03	2.76 2.56
$y_4^2(t) = apr(f_{-}^0T(t) - f_{-}El_{-}Nino(t)) = 0.0077 \cdot t - 16.44$ $y_4^1(t) = apr(f_{-}El_{-}Nino(t) - f_{-}^0T(t)) = 0.0034 \cdot t - 5.53$	2.26	–1.11 0.98	2.86 2.55
$y_5^2(t) = apr(f_{-}CO_2(t) - f_{-}El_{-}Nino(t)) = 0.0032 \cdot t - 6.40$ $y_5^1(t) = apr(f_{-}CO_2(t) - f_{-}El_{-}Nino(t)) = 0.00001 \cdot t - 0.045$	320.0	–0.05 –0.02	2.76 2.48
$y_6^2(t) = apr(f_{-}^0T(t) - f_{-}S_{const}(t)) = 0.0051 \cdot t - 11.02$ $y_6^1(t) = apr(f_{-}S_{const}(t) - f_{-}^0T(t)) = 0.0026 \cdot t - 4.03$	1.96	–1.01 1.00	2.85 2.91
$y_7^2(t) = apr(f_{-}^0T(t) - f_{-}S_{act}(t)) = 0.0044 \cdot t - 9.73$ $y_7^1(t) = apr(f_{-}S_{act}(t) - f_{-}^0T(t)) = 0.0058 \cdot t - 10.20$	0.76	–1.01 0.95	2.85 2.76
$y_8^2(t) = apr(f_{-}^0T(t) - f_{-}CO_2(t)) = 0.0045 \cdot t - 10.04$ $y_8^1(t) = apr(f_{-}CO_2(t) - f_{-}^0T(t)) = 0.0008 \cdot t - 1.50$	5.63	–1.06 1.00	2.88 2.80

В таблице 1 средние значения $mean$ и std характеризуют средние значения и вариации запаздываний по фазе функций $\varphi_2(t)$ относительно $\varphi_1(t)$ (например, функции $f_{-}S_{const}(t)$ относительно $f_{-}S_{act}(t)$) в двух интервалах времени. Величины и положительные знаки коэффициентов k в уравнениях аппроксимаций характеризуют интенсивности опережений по фазе изменений первых переменных относительно вторых в исследованных временных интервалах. Отношения k_2 / k_1 характеризуют изменчивости сравниваемых переменных в интервале времени (1950–2009 гг.) по сравнению с их изменчивостью в 1891–1950 гг. Из таблицы 1 просматриваются следующие закономерности изменений солнечных и климатических переменных в 1950–2009 гг. по сравнению с предыдущим 60-ти летним интервалом (1891–1950 гг.):

- характерно то, что во втором интервале времени, по сравнению с первым, произошли значительные опережения роста одних переменных другими, характеризующими климатические изменения на Земле;
- в обоих интервалах времени рост солнечной активности $S_{act}(t)$ незначительно опережает рост солнечной постоянной с коэффициентами $k_1 = 0.0032$ и $k_2 = 0.0007$ радиан; причем во втором интервале времени произошло замедление роста $S_{act}(t)$ по сравнению с ростом $S_{const}(t)$ (строка 1);
- выросла тенденция роста приземной температуры $^0T(t)$ относительно роста солнечной постоянной с $k_1 = 0.0026$ радиан до $k_2 = 0.0051$; в первом интервале времени рост сол-

- нечной постоянной опережал рост приземной температуры воздуха, во втором интервале рост ${}^0T(t)$ опережал рост $S_{const}(t)$ с коэффициентом k_2 (строка 6);
- во втором интервале времени произошло замедление роста приземной температуры воздуха относительно роста $S_{act}(t)$ с коэффициентом $k_2 = 0.0044$ по сравнению с изменениями этих переменных в интервале 1891–1950 гг.; в этом интервале времени рост солнечной активности опережал рост приземной температуры воздуха с коэффициентом $k_1 = 0.0058$ (строка 7);
 - значительно изменился рост ${}^0T(t)$ и $CO_2(t)$ относительно изменений Эль-Ниньо: во втором интервале времени рост ${}^0T(t)$ опережал рост Эль-Ниньо с отношением $k_2/k_1 = 2.26$ (строка 4) и в особенности произошло сильное опережение роста $CO_2(t)$ рост Эль-Ниньо, $k_2/k_1 = 320$ раз (строка 5);
 - рост $CO_2(t)$ в атмосфере в 1950–2009 годы, по сравнению с его ростом в 1890–1950 гг., привел к росту отношения $k_2/k_1 = 5.63$ (строка 8);
 - на поддержание и активизацию явления Эль-Ниньо, как видно из таблицы 1, влияют светимость Солнца $S_{const}(t)$ и солнечная активность $S_{act}(t)$ с коэффициентами $k_2/k_1 = 3.38$ (строка 2) и $k_2/k_1 = 1.42$ соответственно (строка 3).

Из полученной таблицы 1 следует, что в интервале времени (1950–2009 гг.) произошли значительные изменения климатических переменных, рост приземной температуры воздуха ${}^0T(t)$ и рост интенсивности явления Эль-Ниньо, обусловленные активизацией солнечных переменных и ростом выбросов в атмосферу парниковых газов в этом интервале времени по сравнению с ростом этих переменных в 1891–1950 годы. Причем рост интенсивности явления Эль-Ниньо обусловлен как ростом солнечных переменных, так и ростом приземной температуры воздуха и $CO_2(t)$.

Процессы взаимных изменений и влияний солнечных и климатических переменных количественно можно описать и матрицей коэффициентов взаимных корреляций.

Таблица 2 – Коэффициенты взаимных корреляций между запаздываниями по фазе солнечных и климатических переменных, приведенных в таблице 1

Переменные y_i^2 из табл. 1	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.00	0.50	-0.45	0.00	-0.01	-0.45	0.42	0.01
2		1.00	0.55	0.47	0.50	-0.45	-0.03	-0.02
3			1.00	0.47	0.52	-0.03	-0.43	-0.03
4				1.00	0.48	0.58	0.59	0.54
5					1.00	0.02	0.01	-0.49
6						1.00	0.62	0.55
7							1.00	0.57
8								1.00

Примечание. По критерию Стьюдента [Гмурман, 2000], в таблице 2 все коэффициенты корреляции $r \leq |0.03|$ – не значимы, а коэффициенты $r \geq |0.43|$ – значимы.

Из таблицы 2 взаимовлияний запаздываний и опережений солнечных и климатических переменных относительно друг друга следует, что: а) существует сложная природа слабых и сильных взаимовлияний запаздываний и опережений переменных; б) в частности, циклический процесс изменений солнечных переменных (солнечной постоянной и солнечной активности) запускает циклические процессы изменений между солнечными и климатическими переменными (процессы 2, 3, 6 и 7); в) в свою очередь, циклические процессы между солнечными и климатическими переменными (явление Эль-Ниньо), процессы 2–4, поддерживают солнечно-климатические процессы и активизируют взаимодействие между климатическими переменными, процессы 5 и 6; г) климатический циклический процесс между приземной темпера-

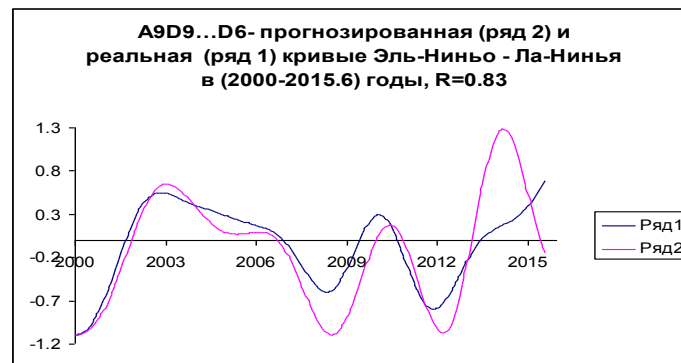
турой ${}^0T(t)$ и парниковым газом $CO_2(t)$ (парниковый эффект) поддерживается процессами 4–7, включая влияние явления Эль-Ниньо, солнечной постоянной и солнечной активности.

Прогнозирование сложного проявления Эль-Ниньо – Ла-Нинья

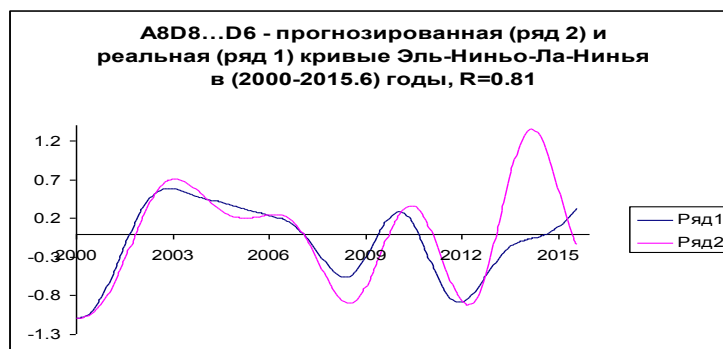
Прогнозирование производится с использованием многомасштабного вейвлет-преобразования исходной функции $S(t)$, представленной на рисунке 1г в 1950–2015/166 годы, на более простые: аппроксимирующие a_j , $j = 1, 2, \dots$ и детализирующие составляющие d_l , $l = 1, 2, \dots$ [9]; прогнозирование этих составляющих по отдельности производится с использованием нечетких нейронных сетей [8], а восстановление исходной прогнозируемой функции реализуется с использованием правила [10]. Примеры использования этого метода прогнозирования случайных процессов изложены в работах [4; 6; 7].

Согласно правилам прогнозирования временных рядов решение задачи производится в два этапа. На первом этапе верификации, с использованием части исходного ряда кривой Эль-Ниньо – Ла-Нинья в 1950–2000 гг., с использованием гибридных нейронных сетей производится подбор параметров сети так, чтобы полученный прогноз ряда в 2000–2015/16 гг. максимально соответствовал исходному ряду. На втором этапе, при выбранных наилучших параметрах сети, производится прогнозирование исходного ряда в 1950–2015/16 гг. до 2050 года.

На графиках рисунка 4 приводятся сравнительные изменения реальной кривой Эль-Ниньо – Ла-Нинья с ее прогнозируемыми в 2000–2015/16 годы разными составами вейвлет аппроксимаций и деталей с коэффициентами согласованности кривых $R = 0.83$ и $R = 0.81$.



а) изменения исходного (ряд 1) и $(A9D9...D6 = a9(t) + d9(t) + \dots + d6(t))$ прогнозируемого (ряд 2) рядов

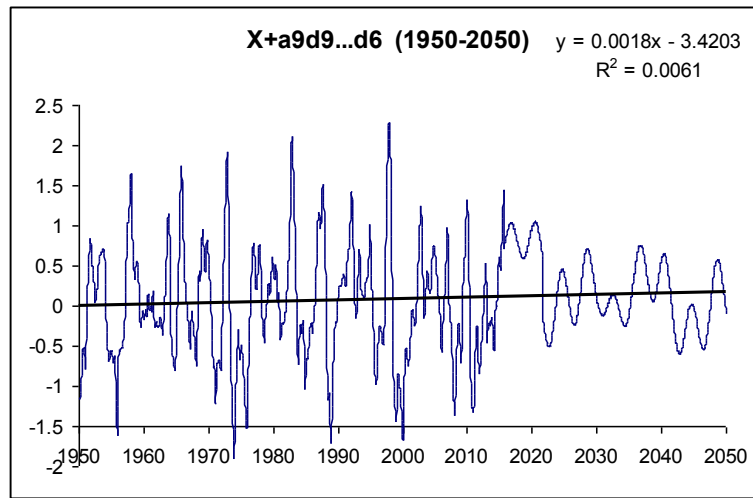


б) изменения исходного (ряд 1) и $(A9D9...D6 = a9(t) + d9(t) + \dots + d5(t))$ прогнозируемого (ряд 2) рядов

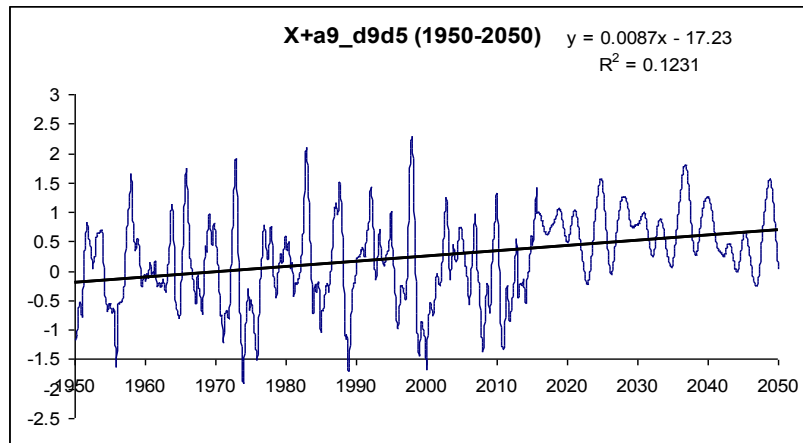
Рисунок 4 – Графики согласованности изменений прогнозируемых и реальной кривых Эль-Ниньо – Ла-Нинья в (2000–2015/16) годы с коэффициентами корреляций $R = 0.83$ а) и $R = 0.81$ б)

На графиках заметно смещение максимумов и минимумов кривых относительно друг друга на ± 0.4 единицы по времени и ± 0.5 по амплитуде. С ростом горизонта прогнозирования после 2013 года наблюдается рост несогласованности изменений кривых.

На графиках рисунка 5 приведены изменения исходных до 1950 года и прогнозируемых до 2050 года индексов явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья в двух вариантах: а) $a_9(t) + d_9(t) + \dots + d_6(t)$ и б) $a_9(t) + d_9(t) + \dots + d_5(t)$ и линейных аппроксимаций кривых.



а) прогнозная кривая $a_9(t) + d_9(t) + \dots + d_6(t)$ после 2015/16 гг.



б) прогнозная кривая $a_9(t) + d_9(t) + \dots + d_5(t)$ после 2015/16 гг.

Рисунок 5 – Графики изменений исходных индексов явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья с 1950 до 2015/16 гг. и прогнозируемых до 2050 года в составе вейвлетных деталей:

а) $a_9(t) + d_9(t) + \dots + d_6(t)$; б) $a_9(t) + d_9(t) + \dots + d_5(t)$

Прогнозируемые кривые на рисунке получены на основе правила Малла. В соответствии с этим правилом прогнозируемый сигнал $S_{prognoz}(t)$ получен в двух вариантах: а) как сумма слагаемых спрогнозированных аппроксимирующей $a_9(t)$ и детализирующих составляющих $d_5(t), \dots, d_9(t)$, т. е. как $S_{prognoz}(t) = a_9(t) + d_9(t) + \dots + d_6(t)$ и б) $S_{prognoz}(t) = a_9(t) + d_9(t) + \dots + d_5(t)$. Состав выбранных вейвлетных деталей, позволяющих с наилучшей точностью восстановить прогнозируемую кривую Эль-Ниньо – Ла-Нинья правилом Малла, определен на этапе верификации. Каждое из этих слагаемых получено прогнозированием исходных составляющих $a_9^0(t)$, $d_9^0(t)$, \dots , $d_5^0(t)$ функции $S(t)$ нечеткой нейронной сетью [8]. Точности прогнозирований каждой из слагаемых деталей составили $10^{-4} \div 10^{-6}$. Кривая 5б получена из 5а добавлением более высокочастотной составляющей $d_5(t)$, чем $d_6(t)$.

Из графиков рисунка 5, после 2016 года, наивысшего проявления Эль-Ниньо, ожидается небольшое ее отступление до 2019 года, затем усиление до 2021 года. В последующие годы

намечается колебательный процесс с похолоданиями в окрестностях точек: 2010, 2023, 2026, ... и потеплениями в окрестностях точек: 2021, 2025, 2028, 2031, ...

Информативной для оценки периодичности изменений функции $S_{prognoz}(t)$ является изображение ее вейвлетной фазо-частотной характеристики (ФЧХ) в 1950–2050 годы, представленной на рисунке 6.

Положительные фазы изображения соответствуют росту температуры поверхности океана (явление Эль-Ниньо), а отрицательные фазы – снижению температуры (явление Ла-Нинья). Таблица цикличности этого сложного явления и цикличностей солнечной постоянной $S_{const}(t)$ и солнечной активности $S_{act}(t)$ при заданных параметрах вейвлета в исследованных интервалах времени приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Цикличности $S_{const}(t)$, $S_{act}(t)$ и явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья

Вейвлет-масштабы	S_{const} 1610–2012 гг.	S_{act} 1610–2012 гг.	Эль – Ниньо 1470–1984 гг.	Эль – Ниньо 1950–2050 гг.
	$mean(std)$, годы	$mean(std)$, годы	$mean(std)$, годы	$mean(std)$, годы
500	47.1(17.7)	46.8(7.9)	69.4 (10.5)	44.0
250	20.2(7.0)	18.5(4.6)	42.4 (10.5)	18.3(1.6)
125	11.2(1.6)	11.0(1.2)	23.2 (7,0)	11.1(1.3)
60	5.1(1.3)	5.9(1.6)	13.0 (3.5)	4.5(0.7)
30	3.2(0.7)	2.9(0.8)	5.3 (1.2)	2.8(0.5)
15	1.8(0.6)	1.5(0.3)	2.5 (0.7)	1.7(0.3)

Из таблицы 3 и изображения вейвлетной фазо-частотной характеристики (рисунок 6) видно, что частотный состав сложного явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья генерируется частотным составом изменений солнечных переменных. Можно утверждать, что в циклическом проявлении структуры Эль-Ниньо – Ла-Нинья, т. е. накопление водами центральной части Тихого океана энергии Солнца и последующее ее рассеивание воздушными потоками атмосферы, циркуляцией водных потоков океана, взаимодействием атмосферы и океана, происходит законами случайных процессов. Эта закономерность отображается в распределении фазо-частотной характеристики явлений, представленного на рисунке 6.

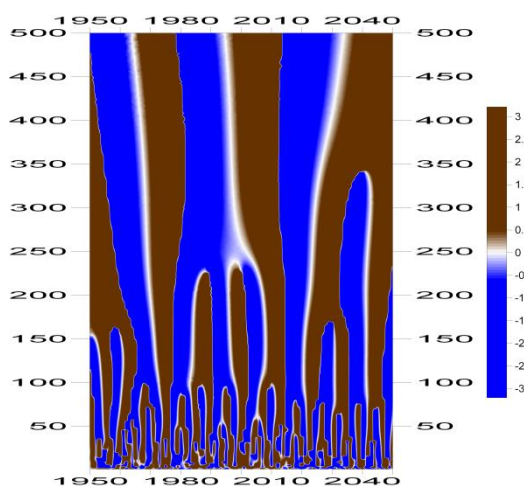


Рисунок 6 – Изображение вейвлетной ФЧХ явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья в интервале времени 1950–2050 годы. Фазы сигнала распределены в интервале $(-\pi, \pi)$ по масштабным уровням в интервале (0–500) вейвлета 'cgaub' (по ординате) и времени (по абсциссе)

На приведенной вейвлетной ФЧХ четко наблюдаются периодичности интенсивностей и продолжительности проявлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья в прошлом с 1950 года и в будущем до 2050 года на разных масштабных уровнях до $a = 500$. Видно, что как время ее проявления, так и ее продолжительность являются величинами случайными. Явления наблюдались и

будут наблюдаться регулярно с периодом около 1.4–2.8 лет с нерегулярными интенсивностями. Из представленного изображения для масштабного уровня вейвлета $a = 200$ выписаны интервалы интенсивных проявлений Эль-Ниньо в: 1950–1961, 1969–1977, 1984–1991, 1995–2002, 2008–2015, 2022–2030 годы, интервалы положительных значений фазы сигнала $S_{prognos}(t)$. Интервалы отрицательных значений фазы сигнала на рисунке 6 соответствуют интенсивным проявлениям Ла-Нинья.

Заключение

Сложное самоорганизующееся природное явление Эль-Ниньо – Ла-Нинья является циклической диссипативной структурой, существующей в экваториальной части Тихого океана, влияющей на формирование климата на Земле и разрушительной экологической обстановки в обширном регионе. В формировании этой структуры участвуют потоки солнечной энергии, генерирующие тепло на поверхности океана и суши Земли, воздушные потоки атмосферы, гидросферные потоки в океанах Земли и биосферные изменения на Земле, взаимодействующие между собой.

Установлено, что цикличность динамической диссипативной структуры, прежде всего, обусловлена цикличностью изменений солнечной постоянной и солнечной активности и описывается нестационарным случайным процессом, который не относится к классу случайных процессов с независимой производной, флуктуации этого процесса растут с ростом его интенсивности.

Вычислены средние периодичности этих изменений. При этом, в среднем, в определенных интервалах времени наблюдаются преобладание опережения или отставания солнечной постоянной относительно изменений солнечной активности; преобладание или замедление влияния этих переменных на изменение климата на Земле. Как видно из таблицы 2, сильные проявления Эль-Ниньо – Ла-Нинья и изменения климата на Земле, более 50 %, определяются относительной изменчивостью солнечных переменных, светимостью Солнца и ее активностью; другим фактором климатических изменений, в том числе и явления Эль-Ниньо, являются изменения инсоляции, обусловленные изменениями орбитальных элементов Земли и взаимодействием атмосферы, гидросферы, биосферы и суши Земли, включая деятельность человечества.

Вычислены запаздывания солнечных и климатических переменных относительно друг друга, их числовые характеристики $mean(t)$ и $std(t)$ и линейные аппроксимации этих запаздываний с коэффициентами k , характеризующими интенсивности запаздываний переменных в двух интервалах времени (1891–1950 гг.) и (1951–2009 гг.) и корреляции между переменными, позволяющие оценить степени взаимовлияний между ними. Анализом коэффициентов k линейных аппроксимаций переменных в двух сравниваемых интервалах времени установлены степени влияний изменений солнечных и климатических переменных, выбросов в атмосферу CO_2 в первом интервале времени, на изменение глобального климата на Земле во втором интервале времени. Установлено количественно, что на изменчивость климатических переменных, явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья в современности, наибольшее влияние оказывают изменчивости солнечных переменных и парниковых газов. Велико влияние изменчивости приземной температуры воздуха $^0T(t)$ на изменчивость явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья и обратно.

С использованием вейвлетного многомасштабного разложения нестационарного сложного случайного процесса кривой Эль-Ниньо на более простые составляющие, прогнозирования этих составляющих нечеткими нейронными сетями и с использованием правила Малла получена прогнозируемая кривая Эль-Ниньо с 2015/16 до 2050 года с прогностической достоверностью $\approx 83\%$; получено изображение ее вейвлетной фазо-частотной характеристики, распределенной на сетке масштабов a (1 : 500) по ординате и временной оси в 1950–2050 гг. Вейвлетное фазо-частотное изображение прогнозируемой кривой $S_{prognos}(t)$ является наглядным распределением по фазе, частоте и времени явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья, на которой отображаются интенсивности и продолжительности их проявлений, имеющие случайный характер. График плотности распределения прогнозируемой кривой Эль-Ниньо – Ла-Нинья не симметричный со средним значением $mean = 0.2182$ и $std = 0.204$. Это означа-

ет, что явление Эль-Ниньо проявляется чаще, чем Ла-Нинья. Можно ожидать более точного прогнозирования явления применением из года в год, по мере накопления наблюдаемых эмпирических данных, метода обучения и прогнозирования в скользящем режиме.

Литература

1. Хименко, В. И. Случайные данные: структура и анализ [Текст] / В. И. Хименко. – Москва : Техносфера, 2017. – 424 с.
2. Дьяконов, В. П. Вейвлеты. От теории к практике [Текст] / В. П. Дьяконов. – Москва : СОЛОН-Пресс. – 2004. – 400 с.
3. Пригожий, И. Порядок из хаоса: новый диалог с природой [Текст] / И. Пригожий, И. Стенгерс. – Москва, 1986. – 432 с.
4. Алексеев, В. И. Вейвлетный фазо-частотный анализ климатических переменных по данным глубокого бурения ледниковых скважин в Антарктиде [Текст] / В. И. Алексеев // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. – 2013. – Т. 4, № 2. – С. 9–26.
5. Алексеев, В. И. Анализ и прогнозирование циклических временных рядов с использованием вейвлетов и нейросетевых нечетких правил вывода [Текст] / В. И. Алексеев // Вестник Югорского государственного университета. – 2013. – Вып. 3. – С. 3–10.
6. Алексеев, В. И. Прогноз изменений температуры по палеоклиматическим данным и инструментальным измерениям на основе методов вейвлет-анализа и нечетких нейронных сетей [Текст] / В. И. Алексеев, Ю. М. Полищук // Вестник Югорского государственного университета. – 2013. – Вып. 3. – С. 11–14.
7. Алексеев, В. И. Прогнозирование динамики изменений орбитально-климатической диаграммы на основе методов вейвлет-анализа и нечетких нейронных сетей [Текст] / В. И. Алексеев // Вестник Югорского государственного университета. – 2018. – Вып. 1. – С. 13–21.
8. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH [Текст] / А. В. Леоненков. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
9. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений [Текст] / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – Москва : Техносфера, 2005. – 1052 с.
10. Малла, С. 2005. Вейвлеты в обработке сигналов [Текст] / С. Малла. – Москва : Мир, 2005. – 671 с.
11. Астафьева, Н. М. Вейвлетный анализ: основы теории и примеры применения [Текст] / Н. М. Астафьева // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 26
12. Вакуленко, Н. В. Свидетельство влияния солнечной активности на Эль-Ниньо – Южное колебание [Текст] / Н. В. Вакуленко, Д. М. Сонечкин // Океанология. – 2011. – Т. 51, № 6. – С. 994–999.
13. Гладильщикова, А. А. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК): цикл шестого оценочного доклада [Текст] / А. А. Гладильщикова, С. М. Семенов // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2017. – Т. 2. – С. 13–25.
14. Эль-Ниньо 2015 и изменение погоды на Земле [Электронный ресурс] // Temperatures.ru. – Режим доступа: http://temperatures.ru/articles/el_nino_2015.
15. Эль-Ниньо [Электронный ресурс] // Википедия : свободная энциклопедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D1%8C-%D0%9D%D0%B8%D0%BD%D1%8C%D0%BE>.
16. Солнечная активность [Электронный ресурс] // Википедия : свободная энциклопедия. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%B5%D1%87%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C.
17. Долгосрочный прогноз солнечной активности (солнечной постоянной) [Электронный ресурс] // Helpiks.ORG. – Режим доступа: <http://helpiks.org/1-115048.html/>