

В. И. Алексеев

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЙ
ОРБИТАЛЬНО-КЛИМАТИЧЕСКОЙ ДИАГРАММЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ
ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА И НЕЧЕТКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

В статье на основе новой концепции орбитальной теории палеоклимата В. А. Большакова, метода кратномасштабного вейвлет-разложения временных рядов и нейросетевых нечетких правил вывода получена спрогнозированная кривая так называемой орбитальной климатической диаграммы (ОКД) в пропорциях 1 : 0.7 : 0.55 (эксцентриситет, угол наклона, прецессия орбиты Земли) в интервале времени от 1000 тыс. лет в прошлом до 100 тыс. лет в будущем от современности. Эта диаграмма является характеристикой изменений климата на Земле, вызванных изменениями инсоляции, основного фактора изменения климата, обусловленными изменениями элементов орбиты Земли. Эффективность метода прогнозирования временных рядов показана верификацией полученной прогнозной траектории ОКД с реальной в интервале времени последних 100 тыс. лет и других палеоклиматических данных с коэффициентом корреляции 0.93.

Ключевые слова: временные ряды, прогнозирование, кратномасштабное вейвлетное разложение, инсоляция, орбитально-климатическая диаграмма, нейронные сети, нечеткий вывод.

V. I. Alekseev

**FORECASTING THE ORBITAL-CLIMATE DIAGRAM DYNAMICS BASED
ON THE WAVELET ANALYSIS AND FUZZY NEURAL NETWORKS**

Based on the new concept of the V. Bolshakov's orbital theory of paleoclimate, as well as the multiscale time-series wavelet decomposition method, and neural network fuzzy inference rules, the paper derives a predicted curve for the so-called orbital-climate diagram (OCD) in the ratio of 1 : 0.7 : 0.55 (eccentricity, orbit inclination, precession) within the time interval from -1000 kyr in the past to 100 kyr in the future since modern times. This diagram features the Earth climate change caused by an insolation change to be the principal factor of the climate change, driven by Earth's orbital elements changes. Efficiency of the time-series forecast method is proved by the obtained predicted OCD trajectory verification within the past 100 kyr period and other paleoclimate data with a correlation coefficient 0.93.

Key words: time series, forecasting, multiscale wavelet decomposition, insolation, orbital-climate diagram, neural networks, fuzzy inference.

Введение

В начале XXI столетия В. А. Большаковым [Большаков, 2003] как эволюция астрономической теории палеоклимата Дж. Кролля и М. Миланковича была предложена новая концепция орбитальной теории палеоклимата. Она учитывает достоинства и недостатки прежней теории и позволяет непротиворечиво, с единых позиций объяснить особенности климатических колебаний на Земле, зависящих от орбитальных переменных Земли: эксцентриситета, угла наклона и прецессии. Новая концепция орбитальной теории палеоклимата позволяет вычислить ожидаемое климатическое воздействие вариаций инсоляции, связанных с тремя орбитальными элементами Земли, и прогнозировать ее динамику на некоторый временной горизонт. В работе [Большаков, 2003] в качестве первичного фактора, управляющего климатическими колебаниями плейстоцена, рассматриваются вариации трех орбитальных элементов Земли (эксцентриситета, угла наклона и прецессии). Кривая, управляющая климатическими колебаниями, была названа орбитально-климатической диаграммой (ОКД) и получена как сумма, совокупность масштабированных орбитальных переменных с определенными пропорциями $1 : 0.7 : (0.4 \div 0.55)$, – коэффициентов климатической значимости трех орбитальных переменных. Коэффициенты климатической значимости орбитальных переменных установлены анализом донных отложений океанов, полученных бурением скважин на дне океанов, кернов льда Гренландии и Антарктиды, уникальных коло-

нок осадков озера Байкал, разрезов лессовой формации. Полученная методом В. А. Большакова орбитально-климатическая диаграмма (ОКД) в пропорции $1:0.7:0.55$ орбитальных переменных Земли, соответствующая интервалу времени за последние три миллиона лет от современности (2000 года), представлена на рисунке 1. Естественно полагать, что пропорция $1:0.7:(0.4-0.55)$, в соответствии с которой изменчивость инсоляции зависит от изменчивости орбитальных элементов Земли, является усредненной. Так как эта пропорция выбрана автором концепции анализом и сопоставлением многочисленных эмпирических данных (донных отложений океанов, кернов льда и др.), полученных в разных точках Земного шара многими исследователями. В эту пропорцию заложены в усредненном виде все динамические процессы, происходящие при взаимодействии всех сфер между собой, определяющие климат на Земле и состояние наблюдаемых эмпирических данных, и всевозможные обратные связи между климатическими переменными и орбитальными элементами.

Астрономическая теория М. Миланковича также основана на вариации инсоляции изменениями орбитальных элементов Земли, но в его теории отсутствует полный учет вариаций орбитальных элементов на изменчивость инсоляции, что связано с отсутствием учета качественных различий влияний орбитальных элементов на изменчивость инсоляции. Миланкович не учел, что вариации эксцентриситета определяют изменения мощности поступающей к Земле в целом солнечной энергии, а вариации наклона земной оси и прецессии практически не изменяют поступающую к Земле в целом годовую инсоляцию, вызывая лишь ее широтное и сезонное перераспределение. Другим недостатком теории М. Миланковича является то, что он при построении модели климатических изменений с учетом вариации инсоляции использовал лишь полугодовые изменения инсоляции под отдельными широтами. Это привело к тому, что инсоляционная диаграмма М. Миланковича справедлива лишь для летнего калорического полугодия и 65° с.ш. и не может быть использована для моделирования и палеоклиматических реконструкций [Большаков, 2003]. В теории слабо учитываются обратные связи между изменениями климатических переменных и орбитальных элементов Земли.

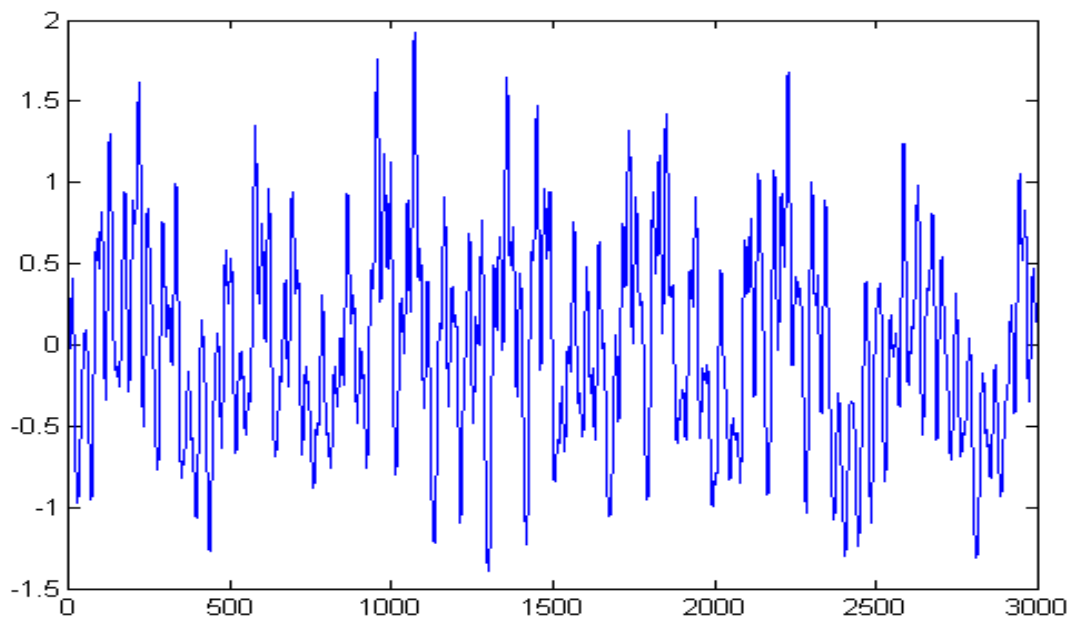


Рисунок 1. График изменения орбитальной климатической диаграммы (ОКД) в интервале времени до 3 млн лет от современности (по оси абсциссы в тыс. лет), полученной суммированием нормированных орбитальных переменных Земли (эксцентриситета, угла наклона и климатической прецессии) в пропорциях $1:0.7:0.55$

В исследованиях графики изменений орбитальных переменных (эксцентриситета, наклона орбиты и прецессии) взяты из работы [Большаков, 2003]. График кривой ОКД является характеристикой изменений климата на Земле, вызванных изменениями инсоляции (основного фактора изменения климата), обусловленными изменениями элементов орбиты Земли. Положительные значения кривой ОКД соответствуют потеплению климата, а отрицательные – похолоданию. В прошлом значительные похолодания климата наблюдались в окрестностях точек 24 и 66.5, 111.5, 150.5 184 тыс. лет назад, потепления наблюдались в окрестностях точек 8, 99.5, 128, 171 215 тыс. лет назад. Эти точки наблю-

даются на графике кривой ОКД рисунка 1 и графике изменений приземной температуры воздуха в интервале времени от современности до 257 тыс. лет в прошлом, в работе [Котляков, 2012]. Эти результаты подтверждают правильность идеи построения кривой ОКД. Расхождения могут быть обусловлены выбором коэффициентов пропорциональности элементов орбиты Земли.

Целью исследований является прогнозирование динамики изменений кривой ОКД на некоторый временной горизонт от современности, тем самым и изменений климата на Земле, обусловленных только изменениями инсоляции, главного фактора климатических изменений.

Методы исследований

Объектом исследования является кривая орбитальной климатической диаграммы (ОКД), полученная методом В. А. Большакова как совокупность орбитальных элементов Земли (эксцентриситета, наклона орбиты и прецессии) в пропорциях $1:0.7:0.55$. Прогнозирование этой функции как временного ряда производится с использованием метода кратномасштабного вейвлет-разложения временных рядов и нейросетевых нечетких правил вывода. Методика кратномасштабного вейвлет-разложения временных рядов изложена в работах [Дьяконов, 2004; Гонсалес, Вудс, 2005]; применение этой методики для прогнозирования климатических переменных изложена в работах [Алексеев, 2013; Алексеев, Полищук, 2013]. Кривая ОКД представлена на рисунке 1. Периоды изменений кривой ОКД, орбитальных элементов Земли [Большаков, 2003] и изотопно-кислородной кривой, взятой из работ [Sosdian S. and Y. Rosenthal, 2009], приведены в таблице 1.

Временные ряды изменений этих переменных были даны в интервале времени (0–3) млн лет. Отметим, что ряды изменений орбитальных элементов Земли и изотопно-кислородных (ИТ) данных В. Большаковым были использованы при подборе значений пропорции ($1:0.7:(0.4 \div 0.55)$) орбитальных элементов в ОКД.

Таблица 1 – Частотные составы (периоды) орбитальных переменных Земли, изотопно-кислородной кривой и орбитально-климатической диаграммы (ОКД)

Масштабы вейвлета “сgau5”		Значения средних и с.к.о (σ) периодов в масштабах						
		1000	500	250	125	60	30	15
Периоды в тыс. лет	Эксцентри-ситет	869	404.2 (26.9)	178.5 (90.2)	98.1 (15.5)	59.5 (16.6)	30.1 (9.7)	12.6 (3.3)
	Угол наклона	806	461.2 (199.3)	203.9 (76.1)	91.1 (30.1)	40.6 (3.6)	41.3 (5.0)	19.6 (8.0)
	Климатическая прецессия	758.3 (66.4)	414.5 (68.9)	189.8 (40.3)	100.0 (25.9)	48.5 (9.5)	22.5 (2.7)	20.6 (3.2)
	$\delta^{18}O$ ‰	1008	423.6 (48.4)	223.7 (41.4)	98.3 (16.4)	44.1 (11.6)	28.9 (6.7)	14.1 (3.7)
	ОКД в пропорции $1:0.7:0.55$	1027.3	404.8 (4.9)	200.3 (113.5)	98.2 (16.9)	40.6 (5.6)	25.8 (8.2)	21.3 (2.7)

Замечание. В таблице в скобках указаны значения среднеквадратических отклонений (с.к.о или σ) периодов изменений переменных. Приведенные выше точностные характеристики зависят от интервалов наблюдений эмпирических данных.

Суть использования вейвлетного многомасштабного метода разложения сложной функции $f(x)$ при прогнозировании ОКД на временной оси состоит в следующем. Исходная кривая ОКД, представленная на рисунке 1, – функция сложная. Как показывает практика, она не поддается прогнозированию известным нечетким нейросетевым методом [Леоненков, 2003]. Но если функцию $f(x)$ подвергнуть декомпозиции с вычислением так называемых аппроксимирующих a_j и детализирующих d_j , $j = 1, 2, \dots$ составляющих, то каждая из этих компонентов прогнозируется с заданной точностью. Из полученных спрогнозированных компонентов по правилу Малла [Дьяконов, 2004; Гонсалес Р., Вудс Р., 2005] может быть получен спрогнозированный сигнал (ОКД). В гибридной нейросетевой модели прогнозирования обучающая выборка представлена четырьмя входными и одним выходным переменными. Перед генерацией структуры системы нечеткого вывода типа Сугено в редакторе ANFIS для каждой из входных переменных задаются по 3 лингвистических термина с треугольными или гауссовскими функциями принадлежности. В качестве типа функции принадлежности выходной переменной задается линейная функция. Обучение сгенерированной сети производится гибридным методом, представляющим собой комбинацию метода наименьших квадратов и метода убывания об-

ратного градиента. Точности обучений δ (с.к.о) всех составляющих сложной функции $f(x)$ находились в интервале ($10^{-7} < \delta < 10^{-3}$) при заданных значениях эпох.

Обсуждение результатов исследований

Из представленной в таблице 1 частотных составов (периодов) орбитальных элементов Земли, синтезированной на основе этих переменных кривой ОКД и климатической изотопно-кислородной (ИК) кривой $\delta^{18}O(t)$ следует, что эти временные ряды содержат почти одинаковый основной состав частот. Характерно то, что изотопно-кислородная кривая $\delta^{18}O(t)$, полученная анализом донных отложений океана, содержит периоды вариаций всех трех орбитальных элементов Земли. Следовательно, энергия Солнца, получаемая Землей (инсоляция), должна быть функцией орбитальных элементов Земли. Эта функция, представленная в виде кривой ОКД, в таблице 1 представлена тем же частотным составом, что и частотные составы орбитальных элементов и ИК; это является признаком того, что ОКД может быть использована для исследования и прогнозирования климата на Земле. В таблице 1 значительные значения вариации σ наблюдаются на уровне масштаба $a = 250$ вейвлета 'coif 5'; на рисунке 5 этот уровень находится в переходной зоне между значениями периодов ~ 400 и ~ 100 тыс. лет.

При решении задачи прогнозирования кривой ОКД с использованием правила Малла и гибридных нейронных сетей решена задача выбора оптимального состава аппроксимирующей и детализирующих составляющих сигнала и параметров метода прогнозирования. При этом задача решается в два этапа. На первом этапе на кривой ОКД в 3 млн лет выбирается кривая от 1100 тыс. лет до 100 тыс. лет от современности и прогнозируется до современности. Из полученных нескольких вариантов прогноза выбирается тот, которому соответствует максимальный коэффициент корреляции между прогнозированной кривой и реальной, и приемлемая точность совпадения реальной кривой с прогнозированной. Этот этап позволяет принять решение об эффективности исследуемого метода прогнозирования и выбрать состав вейвлетных аппроксимирующей и детализирующих составляющих кривой ОКД. Метод считается эффективным, если коэффициент корреляции между реальной кривой и прогнозированной близок к единице и графики кривых близки друг другу с приемлемой точностью. При положительном решении о выборе метода обучению подвергаются аппроксимирующая и детализирующие составляющие кривой ОКД от 1000 тыс. лет до современности, выбранные на первом этапе, и они прогнозируются на заданный временной горизонт, например, на 100 тыс. лет.

Таблица 2 – Коррелируемые вейвлетные составы прогнозируемых и реальных составляющих кривой ОКД, полученных для интервала времени от 100 лет в прошлом до настоящего времени и их коэффициенты корреляций

Прогнозируемые составы кривой ОКД	Реальные составы кривой ОКД	Коэффициенты корреляций
$A_{11}(t) + D_{11}(t) + \dots + D_4(t)$	$a_{11}(t) + d_{11}(t) + \dots + d_4(t)$	0.87
$A_{10}(t) + D_{10}(t) + \dots + D_4(t)$	$a_{10}(t) + d_{10}(t) + \dots + d_4(t)$	0.87
$A_9(t) + D_9(t) + \dots + D_4(t)$	$a_9(t) + d_9(t) + \dots + d_4(t)$	0.87
$A_8(t) + D_8(t) + \dots + D_4(t)$	$a_8(t) + d_8(t) + \dots + d_4(t)$	0.90
$A_7(t) + D_7(t) + \dots + D_4(t)$	$a_7(t) + d_7(t) + \dots + d_4(t)$	0.93
$A_6(t) + D_6(t) + \dots + D_4(t)$	$a_6(t) + d_6(t) + \dots + d_4(t)$	0.84

В таблице 2: $A_i(t), D_i(t)$, $i = 6, \dots, 11$ – прогнозируемые вейвлетные составляющие ОКД (аппроксимирующие и детализирующие), используемые для прогнозирования кривой ОКД в интервале времени от 100 тысяч лет в прошлом до современности; $a_i(t), d_i(t)$, $i = 6, \dots, 11$ – вычисленные (реальные) вейвлет-составляющие ОКД в том же интервале времени. Приведенные в таблице 2 суммы соответствуют правилу Малла для вычисления кривой ОКД в этом интервале времени. Как видно из таблицы, наиболее согласованы изменения функций $y_1(t) = A_7(t) + D_7(t) + \dots + D_4(t)$ и $y_2(t) = a_7(t) + d_7(t) + \dots + d_4(t)$ с высоким коэффициентом корреляции $R_{y_1, y_2} = 0.93$. Графики функций $y_1(t)$ и $y_2(t)$ приведены на рисунке 2а. На графике в некоторых интервалах времени наблюдаются несогласованные изменения прогнозируемых и реальных изменений кривой ОКД. Для сравнения на графике рисунка 2б приведены графики прогнозированной (ряд 2) и реальной кри-

вой ОКД (ряд 1) при другом наборе вейвлетных составляющих с меньшим значением коэффициента корреляции $R_{y_1, y_2} = 0.87$. На этих кривых наблюдается увеличение несогласованных изменений графиков на временной оси. При построении графиков не использованы высокочастотные составляющие детали $d_{1,2,3}(t)$ ввиду их малости и похожести на помеху.

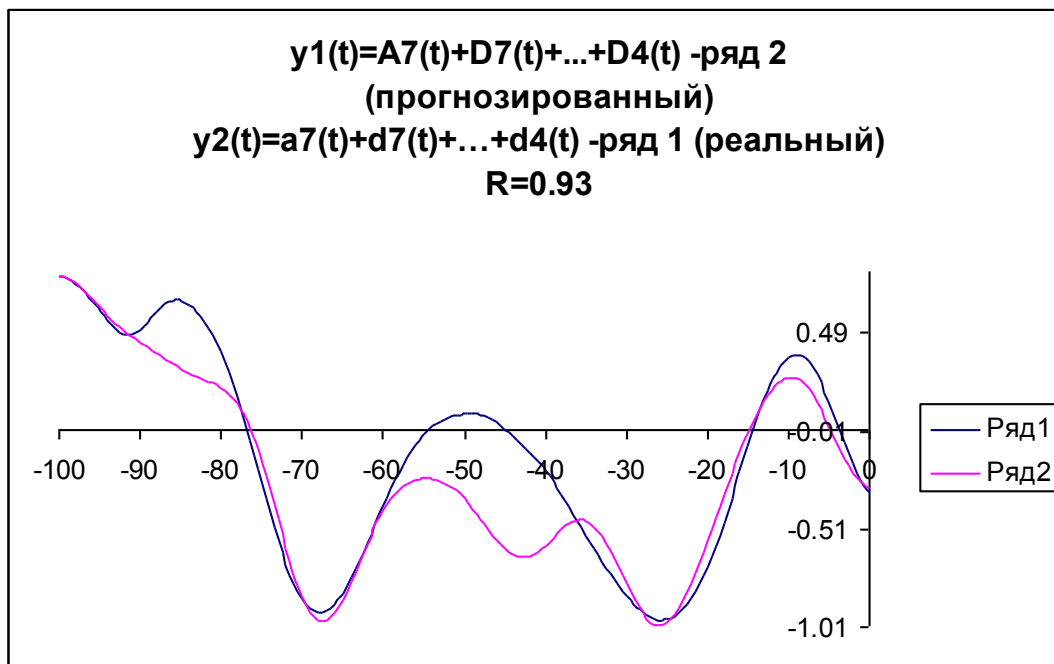


Рисунок 2а. Графики изменений прогнозируемой (ряд 2) и реальной (ряд 1) составляющих ОКД в интервале времени (100 – 0) тыс. лет к современности, полученных правилом Малла многомасштабного разложения функции $y(t) = a_7(t) + d_7(t) + \dots + d_4(t)$

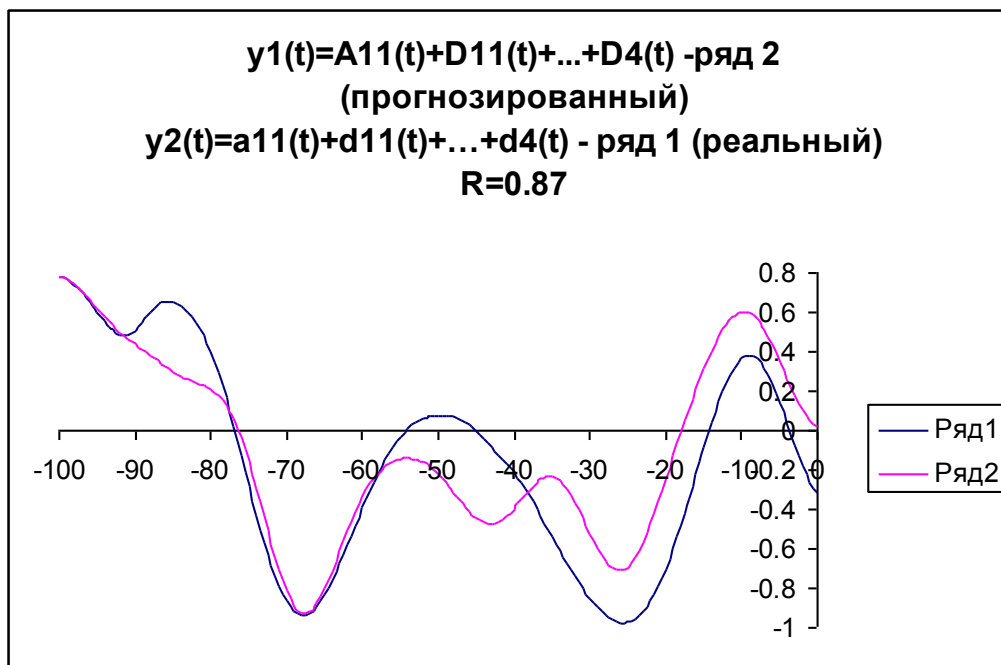


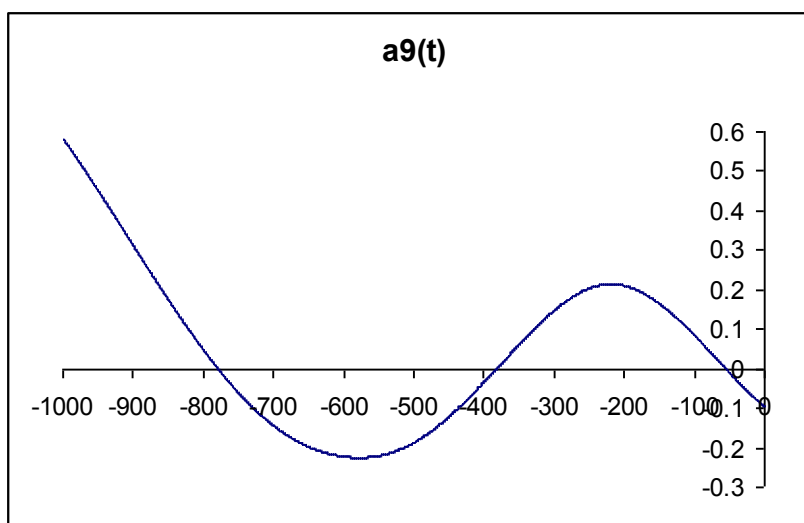
Рисунок 2б. Графики изменений прогнозируемой (ряд 2) и реальной (ряд 1) составляющих ОКД в интервале времени (100 – 0) тыс. лет к современности, полученных правилом Малла многомасштабного разложения функции $y(t) = a_{11}(t) + d_{11}(t) + \dots + d_4(t)$

На прогнозируемой кривой (ряд 2) рисунка 2а можно увидеть временные интервалы потеплений и похолоданий климата. Интервалами потеплений являются окрестности точек: 8., 34,5, 53,5, 80, 100 тыс. лет в прошлом; интервалы похолоданий с центрами: 25, 43,5, 66,5 тыс. лет в прошлом. Эти же интервалы потеплений и похолоданий климата на Земле хорошо наблюдаются на графике измене-

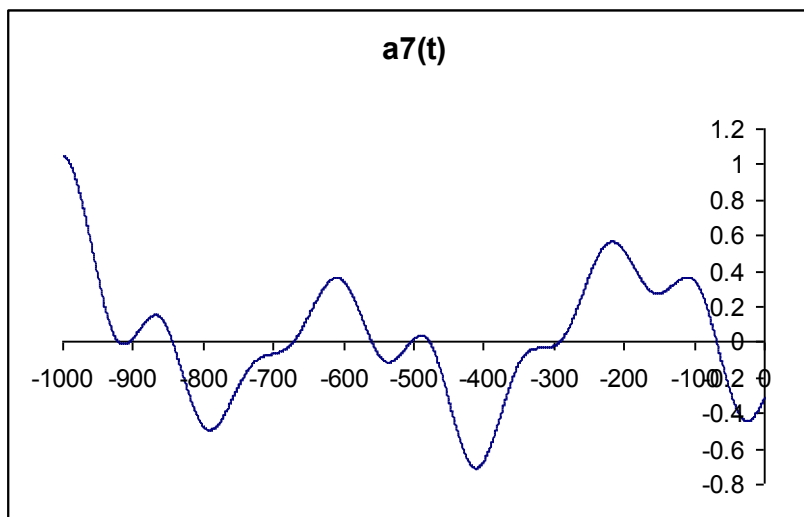
ний температуры на планете, приведенной в работе [Котляков, 2012]. Результаты верификации этого метода позволяют надеяться на возможность его применения и в решении других важных задачах прогнозирования. Эти же результаты исследований подтверждают и приемлемость и полезность использования кривой ОКД для проведения климатических исследований.

Возможность прогнозирования случайных процессов $S(t)$ с набором нескольких основных частот с использованием многомасштабного вейвлетного разложения основана на том, что при этом исходная функция $S(t)$ представляется в виде набора нескольких функций $a_i(t)$, $d_j(t)$, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, k$, каждая из которых содержит меньшее число частот, чем исходная, и которые могут быть прогнозированы с заданной точностью.

С целью иллюстрации метода прогнозирования на рисунке 3 представлены несколько так называемых аппроксимирующих $a_i(t)$ и детализирующих $d_j(t)$ составляющих вейвлет-разложения функции ОКД(t).



а) аппроксимирующая функция $a_9(t)$



б) аппроксимирующая функция $a_7(t)$

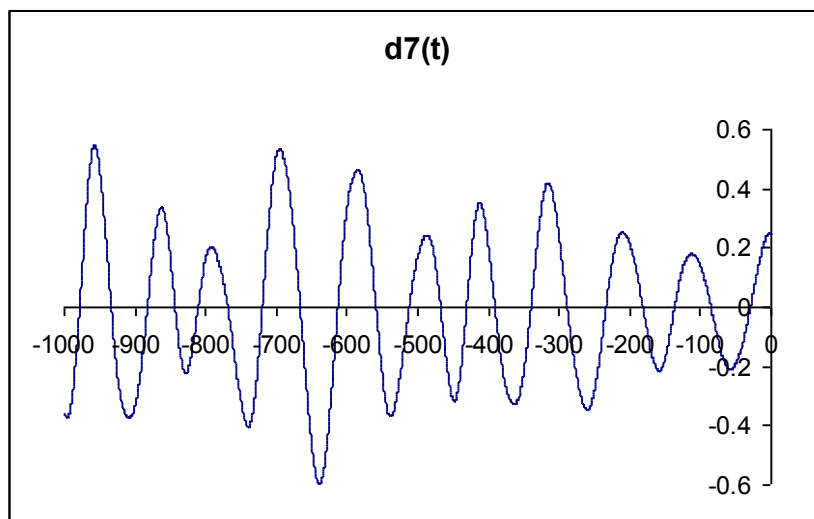
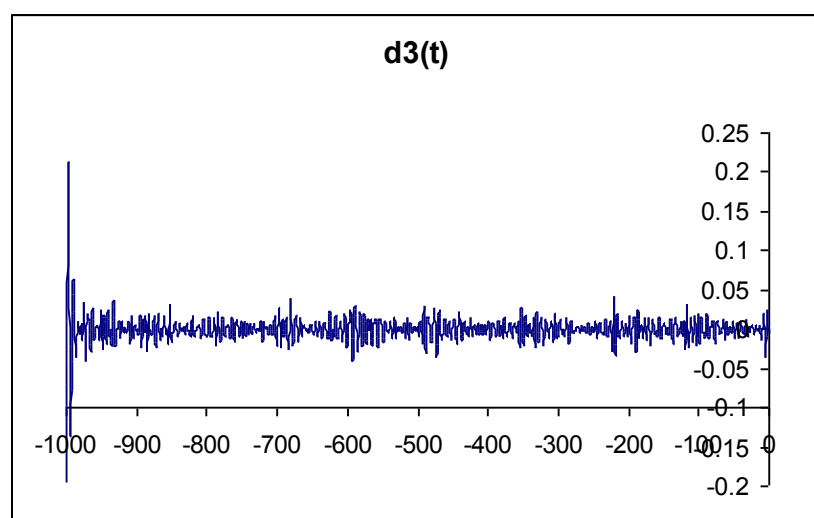
в) детализирующая функция $d_7(t)$ в) детализирующая функция $d_3(t)$

Рисунок 3. Примеры аппроксимирующих и детализирующих составляющих функций кривой ОКД в интервале времени (1000 – 0) тысяч лет к современности, полученных вейвлетом $w = 'coif5'$

Как видно из графиков рисунка 3, все приведенные выше кривые более простые по сравнению с исходной функцией, представленной на рисунке 1, т. е. содержат меньшее число частот и прогнозируются со среднеквадратической ошибкой $\sigma = (10^{-7} - 10^{-3})$.

При выбранном составе аппроксимирующих и детализирующих элементов кривой ОКД на этапе верификации, аналогично вышеописанному, получены прогнозируемые кривые для $a_7(t)$ и $d_7(t)$, $d_6(t), \dots, d_4(t)$ в интервале времени от 1000 тыс. лет в прошлом до 100 тыс. в будущем. График прогнозированной кривой $ОКД(t)$, полученный в интервале времени $(-100 \div 100)$ тыс. лет, приведен на рисунке 4. На этом графике центры интервалов похолоданий климата на Земле находятся в точках (25, 67,5, 90) тыс. лет в прошлом, а центры интервалов глобальных потеплений находятся в точках (8, 49, 85) тыс. лет в прошлом. В этих же точках наблюдаются похолодания и потепления климата на Земле на графике изменений приземной температуры, приведенной в работе [Котляков, 2012]. Современность находится в интервале похолодания климата, который начался еще ≈ 8 тыс. лет назад и продолжится еще $\approx 1,5$ тыс. лет. В будущем центры похолоданий находятся в точках (1,5, 25, 47,5, 89,5), а центры потеплений – в точках (7, 18, 31,5, 74) тыс. лет.

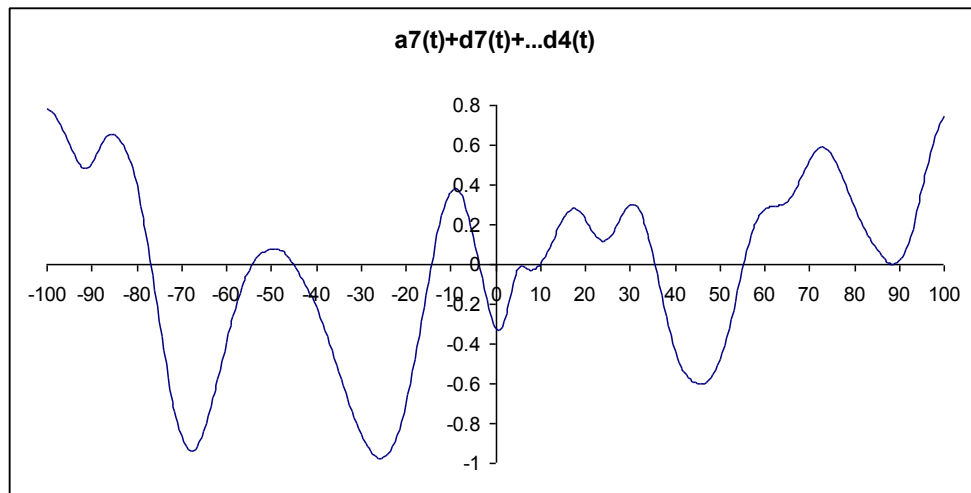


Рисунок 4. Прогнозированная кривая $OKD(t)$ до 100 тыс. лет от современности

На рисунке 5 представлено изображение вейвлетной фазочастотной характеристики спрогнозированной кривой $OKD(t)$ в интервале времени $(-3000 \div 100)$ тысяч лет. На изображении представлено изменение во времени t и масштабам вейвлета $M = (1 \div 1000)$ фазы сигнала $OKD(t)$ в интервале $\mp \pi$. Фаза сигнала изменяется периодичностью 1027, 404, 98, 40, 25.6 и 21 тыс. лет.

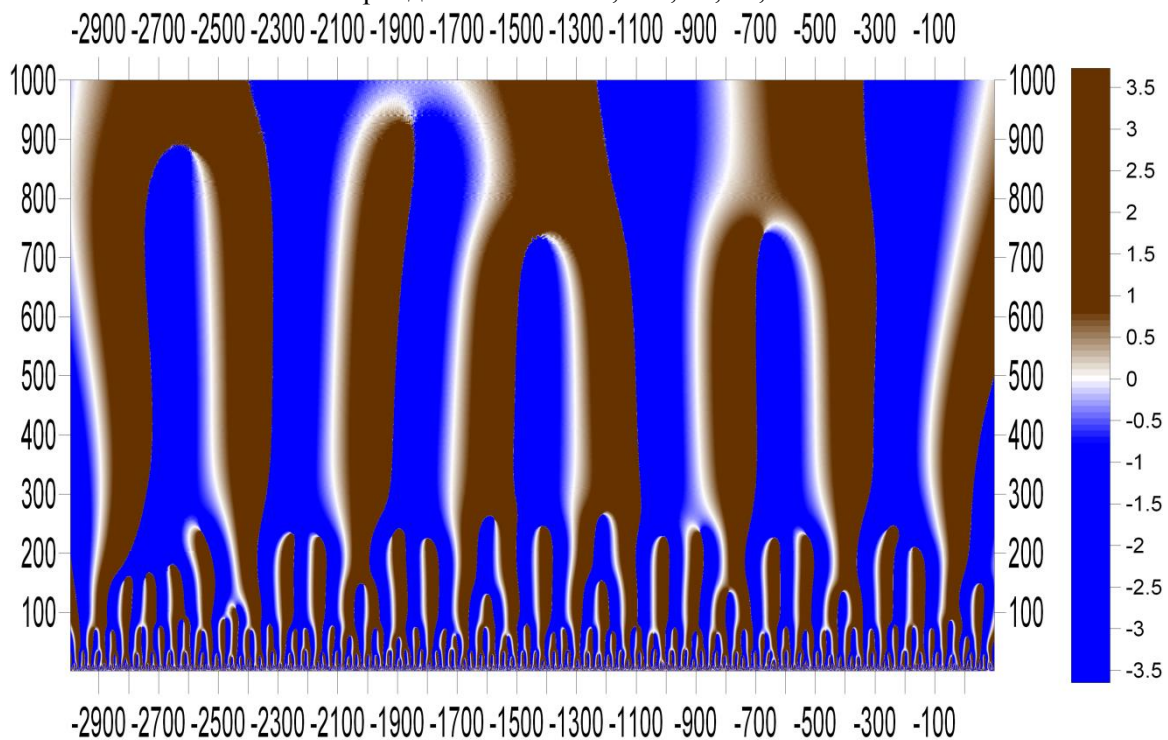


Рисунок 5. Изображение распределения фазы прогнозированной кривой $OKD(t)$ по масштабам $M = (1 \div 1000)$ вейвлета 'coif5' в интервале $(-\pi \div \pi)$ в радианах (по ординате) и времени от 3000 тыс. лет в прошлом до 100 тыс. лет в будущем (по абсциссе)

Состав периодичности спрогнозированной функции OKD приведен в 5-й строке таблицы 1. Она получена из вейвлетной ФЧХ кривой OKD , приведенной на рисунке 5. Как видно из рисунка, спрогнозированная составляющая изображения вейвлетной ФЧХ является хорошим продолжением исходной OKD от 3000 тыс. лет до современности, с теми же периодами. Положительные и отрицательные значения фазы сигнала характеризуют потепления и похолодания климата с разными частотами. Хорошо отражаются распределения периодов по масштабам вейвлета. На низких частотах потепления и похолодания климата, как видно из рисунка 5, чередуются примерно через каждые 404 тысячи лет.

Заключение

На основе новой концепции орбитальной теории палеоклимата В. А. Большакова, устраняющей противоречия в астрономической теории палеоклимата Дж. Кролля и М. Миланковича, метода кратномасштабного вейвлет-разложения временных рядов и нейросетевых нечетких правил вывода получена спрогнозированная кривая так называемой орбитальной климатической диаграммы (ОКД) в интервале времени от 1000 тыс. лет в прошлом до 100 тыс. лет в будущем от современности. Эта диаграмма является характеристикой изменений климата на Земле, вызванных изменениями инсоляции, основного фактора изменения климата на планете, обусловленная изменениями элементов орбиты Земли (эксцентриситета, наклона орбиты и прецессии). Показано, что современность находится на отрицательном склоне уменьшения кривой ОКД ниже оси абсциссы в окрестности точки пересечения оси ординаты с кривой ОКД (в зоне похолодания). В эпоху похолодания человечество вступило примерно ≈ 8 тысяч лет назад, и она продолжится еще примерно 1.5 тыс. лет (от 2000 года). Приемлемость использования исследуемого метода прогнозирования временных рядов показана верификацией полученной прогнозной траектории ОКД с реальной и других палеоклиматических данных, коррелирующих между собой с коэффициентом 0.93.

Литература

1. Большаков, В. А. Новая концепция орбитальной теории палеоклимат / В. А. Большаков. — М., 2003. — 256 с.
2. Milankovitch, M. Astronomische Mittel zur Erforschung der erdgeschichtlichen Klimate. Handbuch der Geophysik, Bd. 9, Lfg. 3, 1938. — P. 593—698.
3. Croll, J. Climate and time in their geological relations: a theory of secular changes of the Earth's climate. — London : Edward Stanford, 1875. — 577 p.
4. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. — М. : Техносфера, 2005. — 1072 с.
5. Дьяконов, В. П. Вейвлеты. От теории к практике / В. П. Дьяконов. — Изд. 2-е. — М. : СОЛОН-Пресс, 2004. — 400 с.
6. Алексеев, В. И.. Анализ и прогнозирование циклических временных рядов с использованием вейвлетов и нейросетевых нечетких правил вывода / В. И. Алексеев // Вестник Югорского государственного университета. — 2013. — № 3(30).
7. Алексеев, В. И. Прогноз изменений температуры по палеоклиматическим данным и инструментальным измерениям на основе методов вейвлет-анализа и нечетких нейронных сетей / В. И. Алексеев, Ю. М. Полищук // Вестник Югорского государственного университета. — 2013. — № 3(30).
8. Алексеев В. И. Вейвлетный фазочастотный анализ климатических переменных по данным глубокого бурения ледниковых скважин в Антарктиде / В. И. Алексеев // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 4. — 2013. — № 2 (8). EDCCrar0010.
9. Котляков, В. М. История климата Земли по данным глубокого бурения в Антарктиде / В. М. Котляков // Природа. — 2012. — № 5. — С. 3—8.
10. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH / А. В. Леоненков. — СПб. : БХВ-Петербург, 2003. — 736 с.
11. Sosdian S. and Rosenthal Y. Deep-sea temperature and ice volume changes across the Pliocene-Pleistocene climate transitions. Science 325 (5938), 2009 — P. 306—310.