

УДК 551.58; 517.9

ВЕЙВЛЕТНЫЙ ФАЗО-ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ ПО ДАННЫМ ГЛУБОКОГО БУРЕНИЯ ЛЕДНИКОВЫХ СКВАЖИН В АНТАРКТИДЕ

Алексеев В.И.

Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

v_alekseev@ugrasu.mail.ru

Вычислены значимые корреляционные зависимости между климатическими переменными, полученными анализом кернов льдов Антарктиды. С использованием кратномасштабного одномерного непрерывного вейвлет-преобразования и дифференциальных законов распределения вейвлет-фазочастотного преобразования климатических переменных установлены два типа антисимметричных друг другу законов распределений изменчивостей фаз климатических переменных. К первой группе относятся ряды изменчивостей дейтерия (температуры), толщины льда и уровня моря, имеющих положительную асимметрию, ко второй, - ряды изменчивостей инсоляции, метана, углекислого газа и атмосферной пыли с отрицательной асимметрией.

Вычислением дифференциальных законов распределений разностей вейвлетных фазо-частотных характеристик рядов температуры и парниковых газов ($\Delta T^0 C - CO_2$, $\Delta T^0 C - CH_4$) и рядов углекислого газа и метана ($CO_2 - CH_4$) в исторических временных интервалах от 800 и 422 тыс. лет до современности в целом и по 100, 105,5 и 400 - тысячным временным интервалам установлены временные интервалы, в которых в среднем фаза роста температуры опережает фазы роста углекислого газа и метана, а фаза роста CO_2 опережает фазу роста CH_4 ; установлены временные интервалы, в которых эти условия не выполняются.

Установлена закономерность, что опережение фазы роста температуры фазам роста парниковых газов является колебательным и не периодическим на всех уровнях периодичностей климатических переменных. Установлена тенденция опережения фазы роста температуры фазам роста парниковых газов в среднем в продолжительных интервалах временных рядов климатических переменных.

Ключевые слова: климатические переменные, вейвлетная функция, крупномасштабные вейвлет-преобразования, вейвлет-фазочастотное преобразование, парниковые газы.

Цитирование: Алексеев В.И. 2013. Вейвлетный фазо-частотный анализ климатических переменных по данным глубокого бурения ледниковых скважин в Антарктиде // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 4. № 2 (8). EDCCrar0010.

ВВЕДЕНИЕ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Статья посвящена актуальной проблеме изменений глобального климата в течение последних 800, 422 тысяч лет. Исследования проводились по данным глубокого бурения ледниковых скважин в Антарктиде, которые хранятся в Международном банке палеоклиматических данных [www.ncdc.noaa.gov/paleo/icescore/html]. Данными глубокого бурения ледниковых скважин являются временные ряды, содержащие результаты физического и химического анализов ледниковых кернов, пробуренных в Антарктиде на советской станции “Восток” и станции “Купол С” европейского проекта бурения ледникового щита Антарктиды (EPICA – European Project for Ice Coring in Antarctic). Первый из этих рядов покрывает период последних более чем 400 тысяч лет, а второй – более 800 тысяч лет. На станции “Восток”, в результате физико-химического анализа ледового керна получены ряды концентраций атмосферной пыли, изотопов кислорода ^{18}O и водорода (дейтерия - D), парниковых газов (двуокиси углерода CO_2 и метана CH_4), а также изменения инсоляции и уровни моря, толщины льда. По изотопному составу кислорода ^{18}O и дейтерия D ледникового керна определяется атмосферная температура [Мохов, 2005]. Перечисленные выше ряды характеристик климата приведены и обсуждаются в монографии [Котляков, 2000], в статье [Котляков, 2012]. В исходных материалах [Котляков, 2012] концентрации D и ^{18}O в анализируемых пробах оцениваются в виде отклонений δ относительно их концентраций в стандартной средней

океанической воде (эталоно) в тысячных долях ‰ и обозначаются как δD и $\delta^{18}O$. Временные ряды изменений температуры ΔT^0C , двуокиси углерода CO_2 и метана CH_4 , полученные по данным европейского проекта на станции “Купол С”, приведены также в работах [EPICA, 2004; Jouzel, 2007; Бялко, 2009]. Относительная точность временных шкал сравниваемых рядов составляет ± 1000 лет [Вакуленко, 2004; Монин, 2005].

Установление причинно-следственных связей долговременных изменений температуры и концентрации парниковых газов (КПГ) в атмосфере, важный вопрос в проблеме изменений климата. Важно установление связи между потеплением климата, ростом или убыванием КПГ. Было показано [Petit et al., 1999], что температура воздуха, определенная по содержанию дейтерия δD в ледниковом керне станции Восток, убывала при наступлении четырех ледниковых эпох в фазе с убыванием метана CH_4 , убывание же углекислого газа CO_2 несколько запаздывало. В работах [Вакуленко, 2004; Монин, 2005] были количественно проверены выводы работ [Petit et al., 1999; Fischer et al., 1999] с использованием метода кросскорреляции и техники вейвлетного преобразования временных рядов климатических переменных. Подобное исследование проведено также в работе [Мохов, 2005], в которой приводятся результаты исследований фазовых сдвигов между температурными вариациями и содержанием углекислого газа CO_2 и метана CH_4 , а также фазовых сдвигов между содержанием углекислого газа CO_2 и метана CH_4 по данным антарктической станции Восток за последние 420 тыс. лет в диапазоне периодичности временных рядов 200 тыс. лет .

Нами для проведения исследований в качестве исходного материала использованы графики временных рядов, приведенных в журнальных статьях [Котляков, 2012; Бялко, 2009], характеризующих изменения климата. Эти графики отсканированы и оцифрованы.

Целью данной работы является уточнение и дополнение в оценках причинно-следственных связей в земной климатической системе на разных временных интервалах, полученных ранее в работах [Petit, 1999; Вакуленко, 2004; Монин, 2005; Мохов, 2005; Бялко, 2009] в исторических временных интервалах от 422 и 800 тыс. лет до современности и на разных диапазонах периодичностей временных рядов климатических переменных .

МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для выявления причинно-следственных связей в земной климатической системе использованы широко известный корреляционный анализ, метод многомасштабного вейвлет - преобразования [Блаттер, 2004; Дьяконов, 2004], а именно, вейвлетные фазо-частотные преобразования временных рядов с вычислением дифференциальных законов распределений этих преобразований. Этот метод ранее использован автором для прогнозирования временных рядов [Алексеев, 2013; Алексеев, Полищук, 2013].

Вейвлетный анализ временных рядов проводится в несколько этапов с использованием комплексного гауссовского вейвлета порядка 5 [Дьяконов, 2004], который является пятой производной комплексной функции Гаусса

$$F(x) = C_5 \cdot e^{-ix} \cdot e^{-x^2}$$

Здесь величина C_5 такая, что вторая норма 5-й производной функции $F(x)$ стремится к 1.

В работах [Вакуленко, 2004; Монин, 2005; Мохов, 2005] вейвлетный анализ производится с использованием комплексной функции Морле, как наиболее часто используемой в метеорологии. Особенностью комплексной функции Гаусса, также как и функции Морле, является то, что он обеспечивает непрерывную декомпозицию сигнала, функция psi задается явно, не гарантирует ортогональный анализ и реконструкцию сигнала [Дьяконов, 2004].

Непрерывные многомасштабные вейвлет-преобразования (ВП) временных рядов $f_i(t)$ производятся по формуле

$$Wf_i(b,a) = \frac{1}{|a|^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} f_i(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, (1)$$

в которой вейвлетная функция $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ комплексная, a - масштабирующий параметр, задаваемый вектором размерности M при вычислениях, b - параметр сдвига (время), $f_i(t)$ - анализируемый временной ряд, где i - номер временного ряда. Из формулы (1) видно, что ВП есть отображение одномерной функции $f_i(t)$ на двумерную плоскость (b, a) , координаты на которой заданы в виде: абсцисса b - время, ордината a - масштаб, $\overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}$ - комплексно-сопряженная вейвлетная функция.

На следующем этапе анализа вычисляются многомасштабные фазы $\zeta_i(b, a)$ ВП по формуле

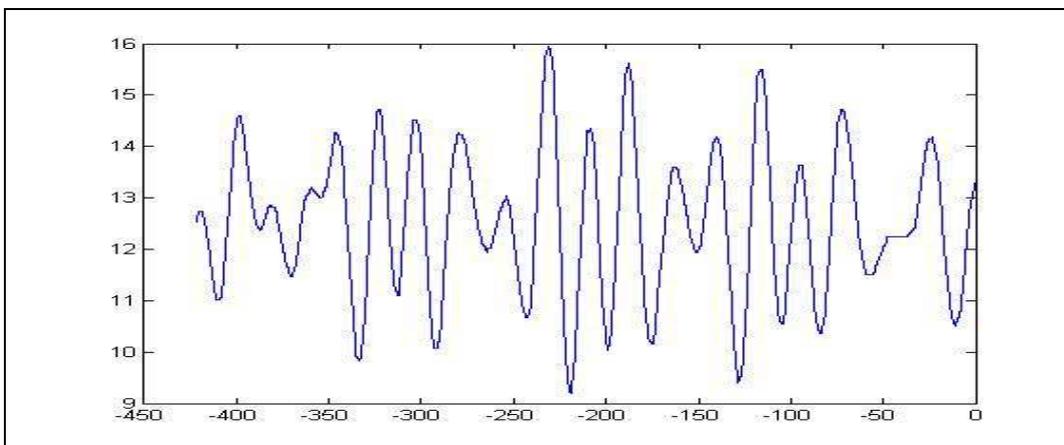
$$\zeta_i(b, a) = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{\operatorname{Im}Wf_i(b, a)}{\operatorname{Re}Wf_i(b, a)}\right), i = 1, \dots, N, (2)$$

и разности фаз $\zeta_i(b, a) - \zeta_j(b, a)$, где i и j - номера сравниваемых временных рядов.

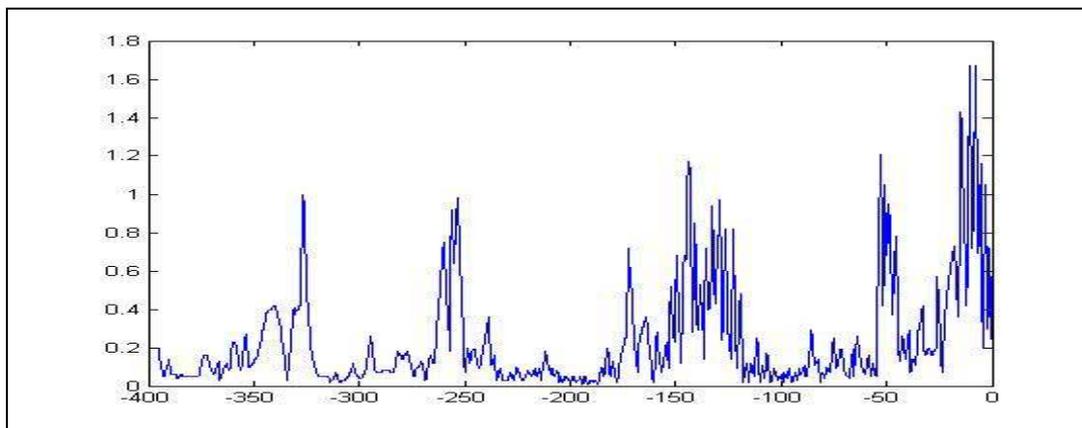
В формуле (2) N - число сравниваемых временных рядов. Значения фаз сигналов $\zeta_i(b, a)$ изменяются в интервале $\mp \pi$, а разности фаз, - в интервале $\mp 2 \cdot \pi$. В графиках функций $\zeta_i(b, a)$ и $\zeta_i(b, a) - \zeta_j(b, a)$ по оси абсцисс откладывается время t в тысячах лет, по оси ординат, - масштабирующий параметр a вейвлета. Параметру a вейвлета пропорциональны периодичности исследуемых временных рядов климатических переменных.

В статье, в отличие от других перечисленных выше работ, для сравнительного анализа изменчивостей временных рядов вычисляются также дифференциальные распределения $G(\zeta_i(b, a))$ функций $\zeta_i(b, a)$ и их разностей $\Delta G[\zeta_i(b, a) - \zeta_j(b, a)]$. На последнем этапе анализа по полученным плотностям распределений разностей фаз $\overline{\Delta G[\zeta_i(b, a) - \zeta_j(b, a)]}$ вычисляются средние значения $\overline{\Delta G[\zeta_i(b, a) - \zeta_j(b, a)]}$ для сравниваемых временных рядов i и j . Здесь черточка сверху обозначает знак вычисления среднего.

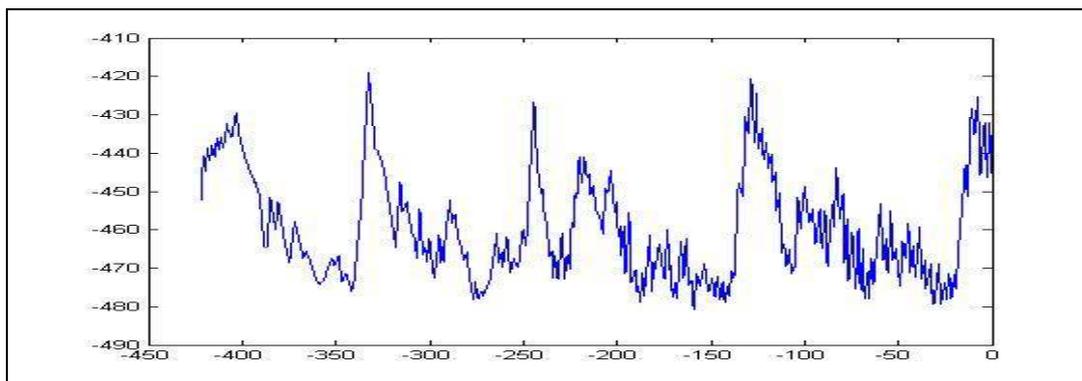
Графики исследуемых переменных. На рисунке 1 приведены графики временных рядов климатических переменных с историей климата за последние 422 тыс. лет. Полученные графики соответствуют долготе и широте станции Восток в Антарктиде с координатами: $78^{\circ}28'S$, $106^{\circ}48'E$. Станция находится на высоте 3488 м от уровня моря [Petit, 1999].



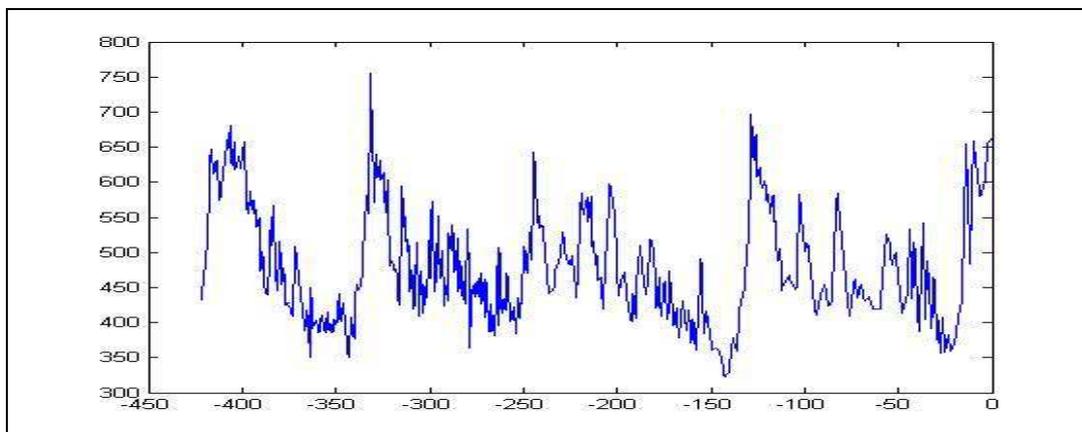
А. Инсоляция, Лн (ленгли)



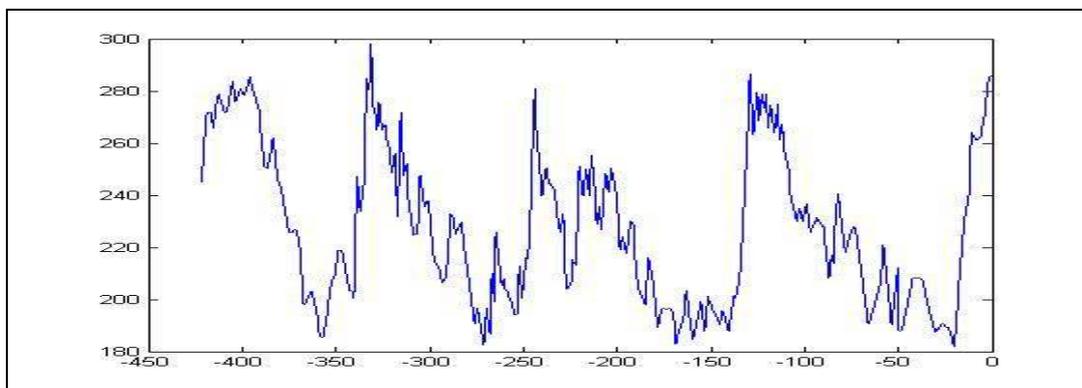
Б. Атмосферная пыль, ppm (объемных частей на миллион)



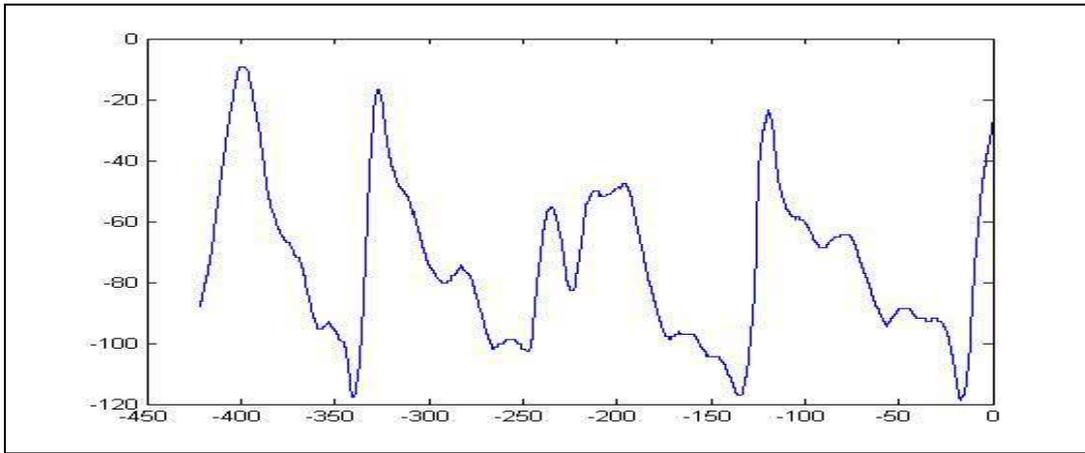
В. Изотоп дейтерия δD (температуры), ‰



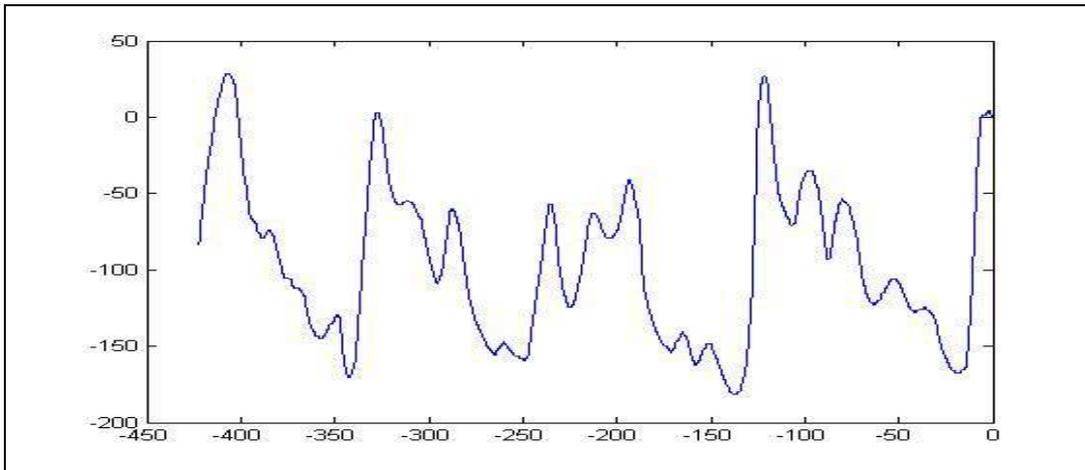
С. Метан CH_4 , ppbv (объемных частей на миллиард)



Д. Двуокись углерода CO_2 , ppmv (объемных частей на миллион)



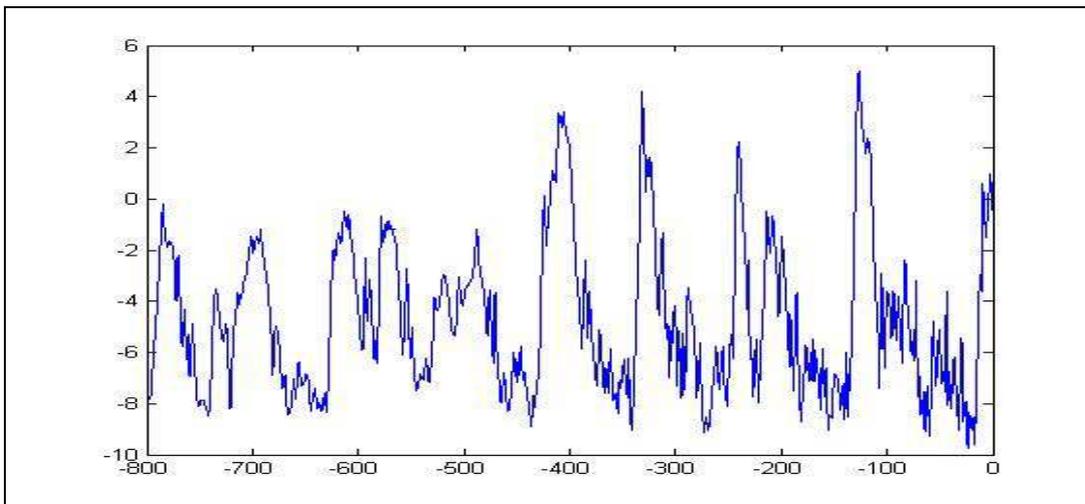
Е. Уровень моря, м



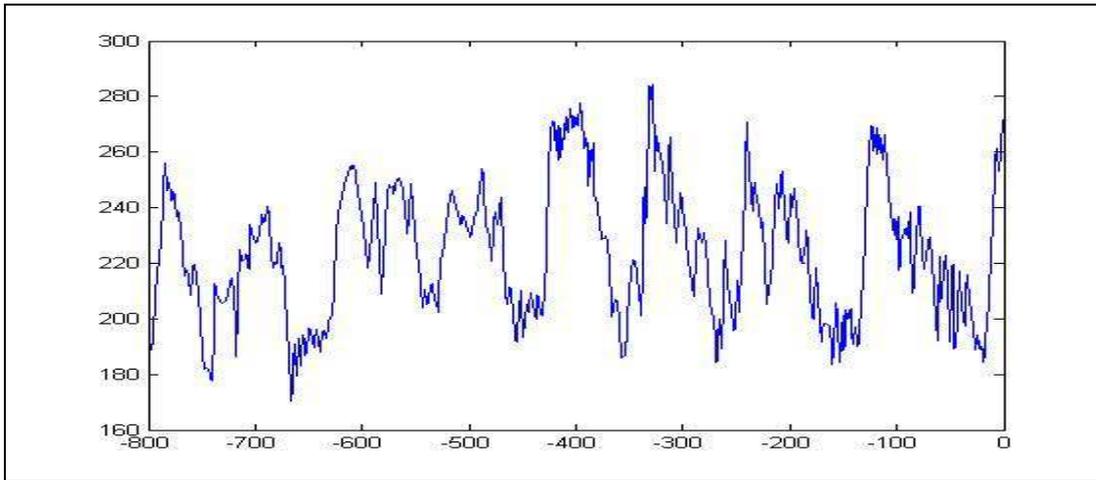
Ж. Толщина льда, м

Рисунок 1. Графики временных рядов климатических переменных за последние 422 тыс. лет по данным анализа керна антарктического льда из скважины со станции Восток [Котляков, 2012].

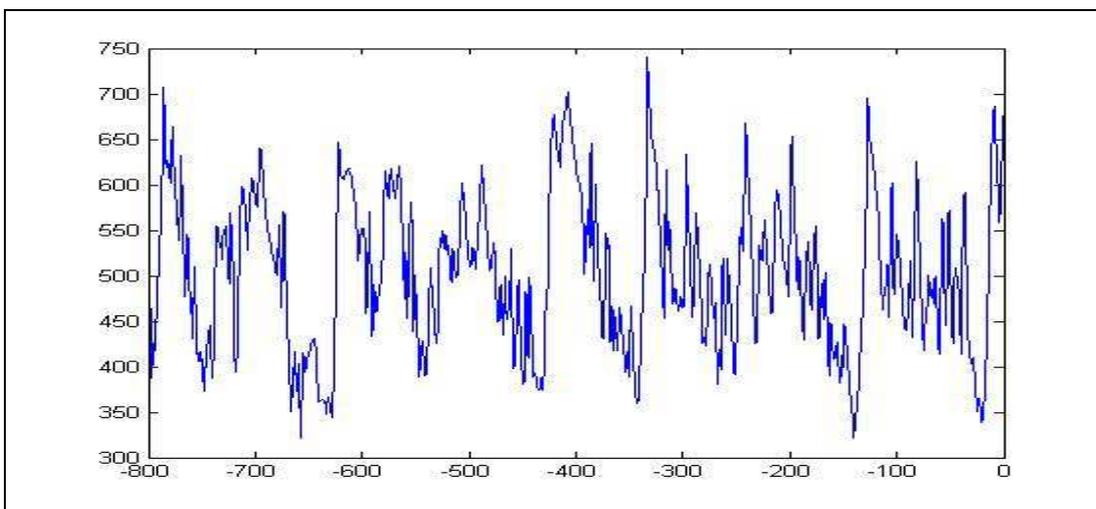
Ниже приводятся графики изменения температуры $\Delta T^{\circ}C$, содержания углекислого газа CO_2 и метана CH_4 с историей климата за последние 800 тыс. лет по данным ледниковых кернов с антарктической станции “Купол-С” [Бялко, 2009].



А. Температура $\Delta T^{\circ}C$



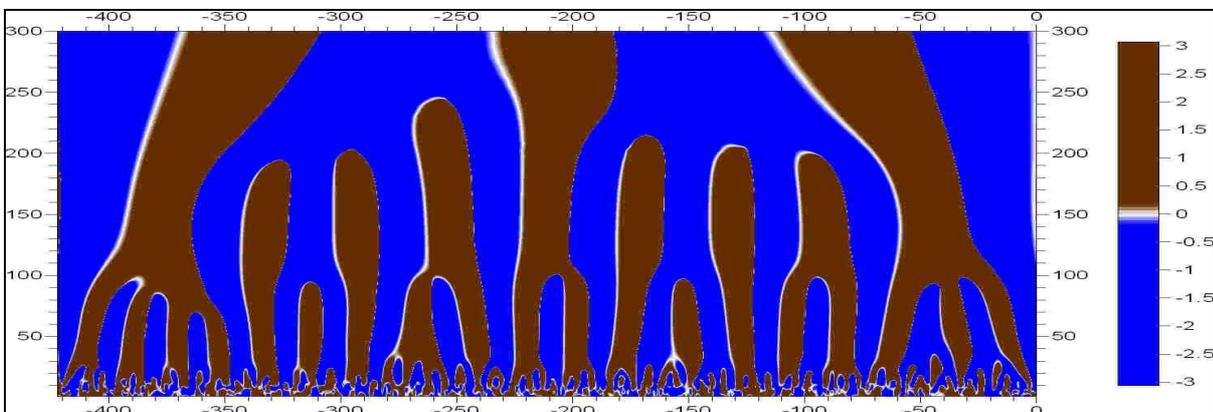
Б. Двуокись углерода CO_2 , ppmv (объемных частей на миллион)



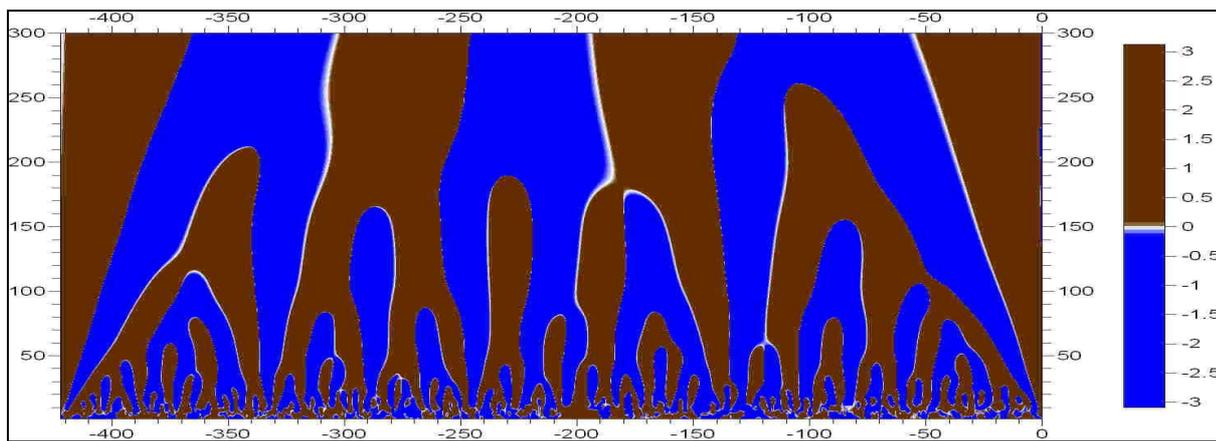
В. Метана CH_4 , ppbv (объемных частей на миллиард)

Рисунок 2. Графики временных рядов климатических переменных $\Delta T^0C, CO_2, CH_4$ за последние 800 тыс. лет по данным анализа керна антарктического льда из скважины со станции “Купол-С”

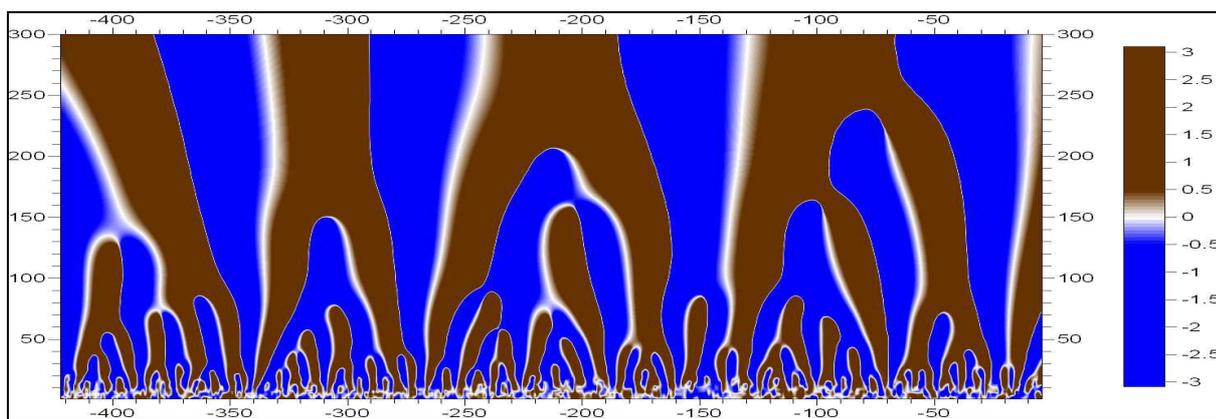
Ниже, на рисунке 3 представлены вейвлетные фазо-частотные характеристики (ФЧХ) временных рядов климатических переменных за последние 422 тыс. лет (ось абсцисс) по данным керна из скважины со станции Восток. По оси ординат, - вектор масштаба a вейвлета размерности $M = 300$. Они получены с использованием преобразований (1) и (2).



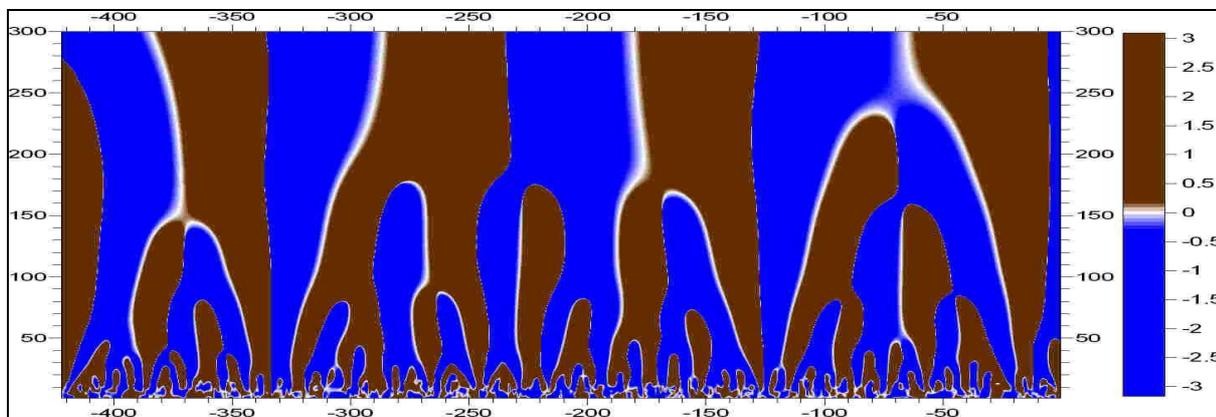
А. Инсоляции, Лн



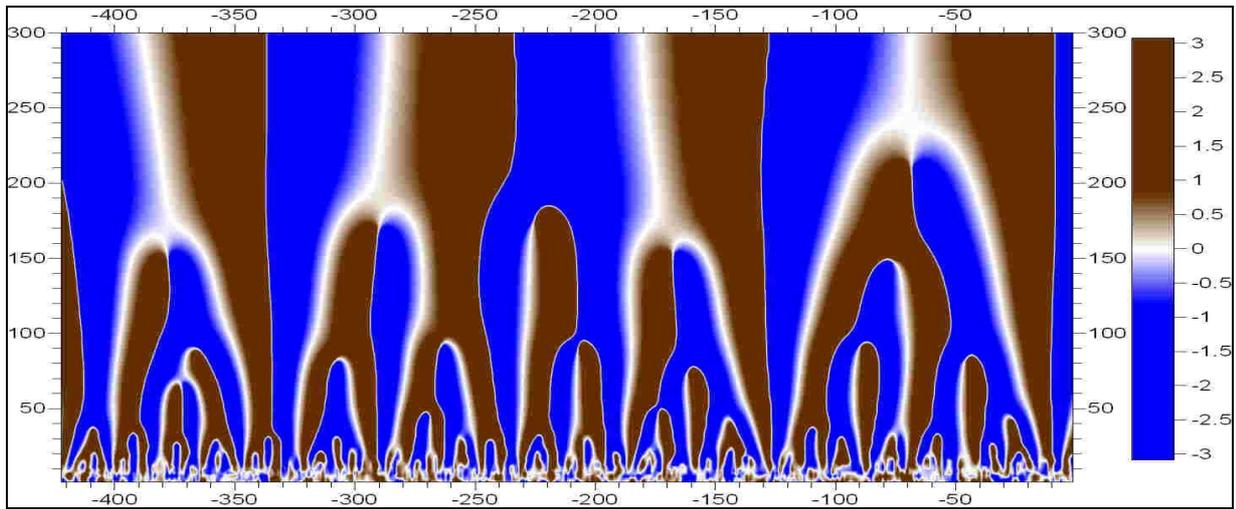
Б. Изотопа дейтерия δD (температуры)



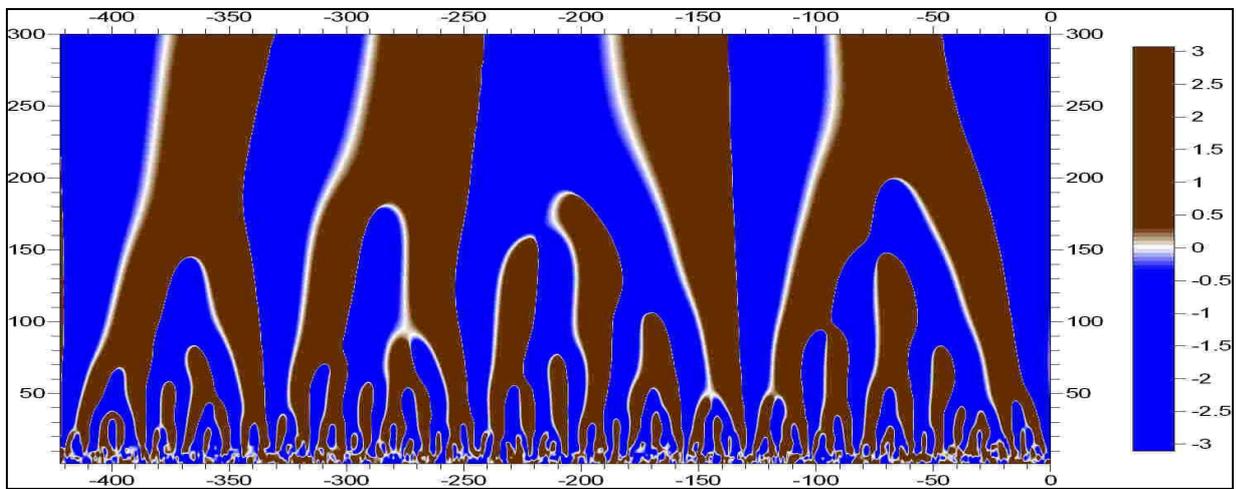
В. Атмосферной пыли, ppmv (объемных частей на миллион)



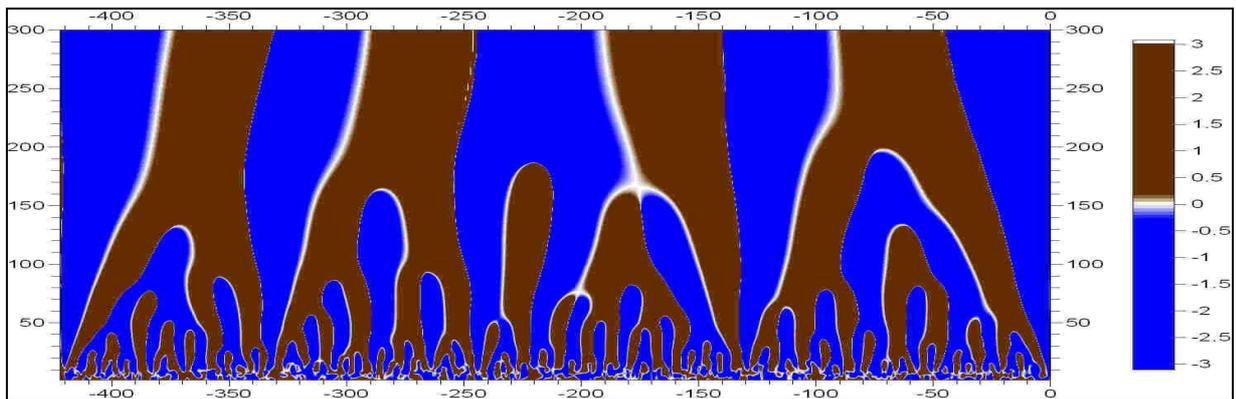
Г. Уровня моря, м



Д. Толщины льда, м



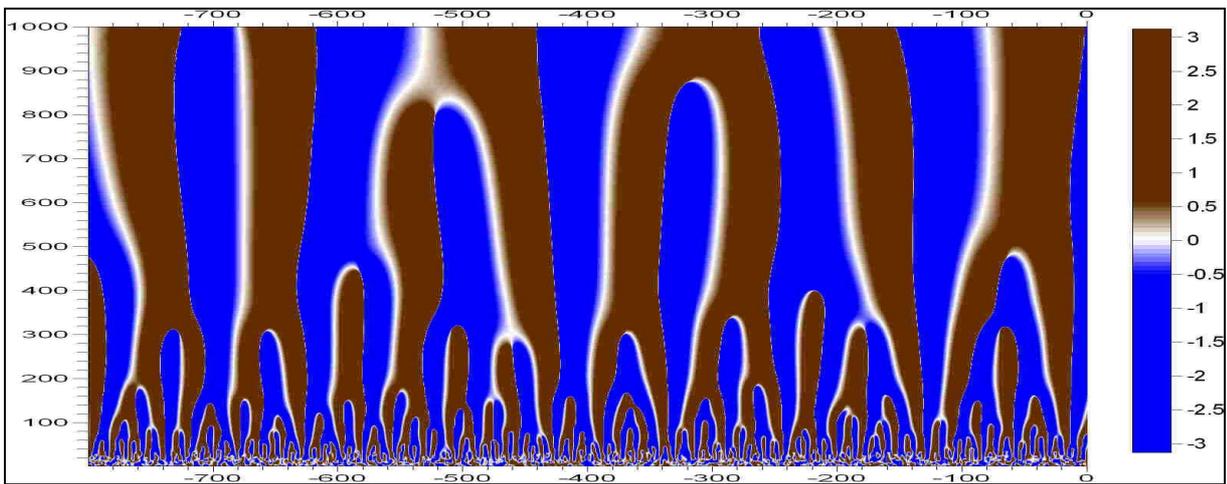
Е. Метана CH_4 , ppbv (объемных частей на миллиард)



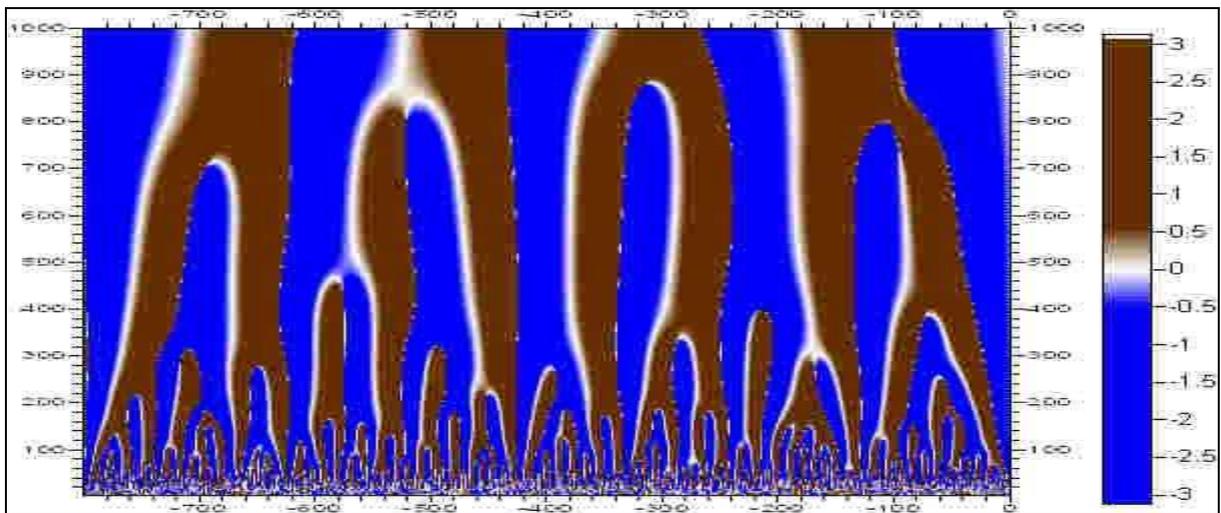
Ж. Двуокиси углерода CO_2 , ppmv (объемных частей на миллион)

Рисунок 3. Вейвлетные фазо-частотные характеристики временных рядов климатических переменных за последние 422 тыс. лет по данным керна из скважины со станции Восток

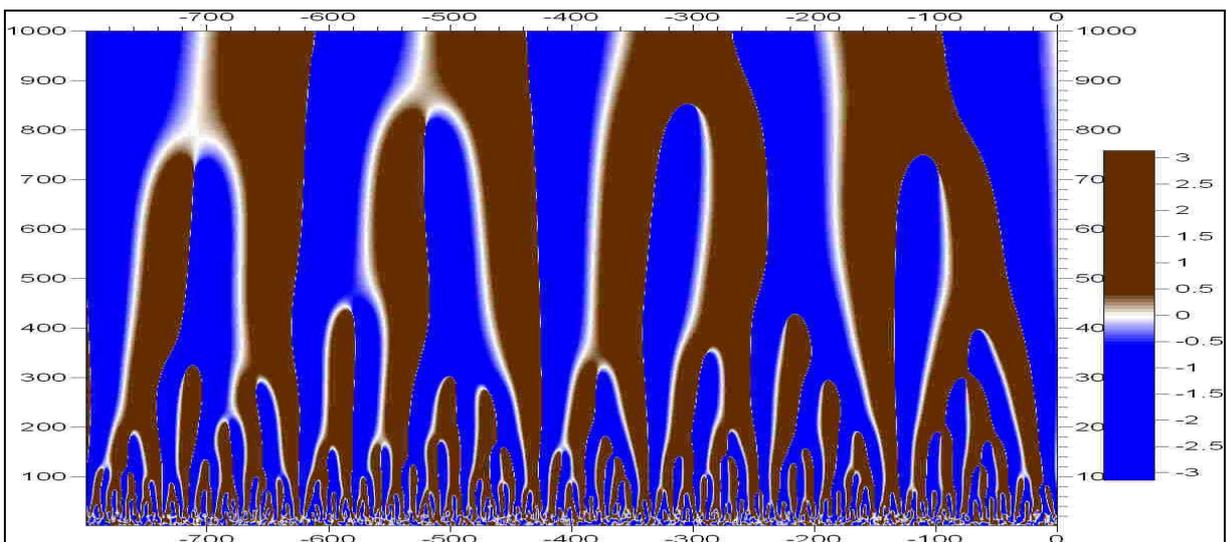
Ниже представлены вейвлетные ФЧХ временных рядов климатических переменных за последние 800 тыс. лет (по оси абсцисс) по данным анализа керна из антарктического льда со станции Купол-С. По оси ординат, - вектор a размерности $M = 1000$.



А. Температуры $\Delta T^{\circ}C$



Б. Углекислого газа CO_2 , ppmv (объемных частей на миллион)



В. Метана CH_4 , ppbv (объемных частей на миллиард)

Рисунок 4. Вейвлетные ФЧХ временных рядов климатических переменных температуры $\Delta T^{\circ}C$, углекислого газа CO_2 и метана CH_4 с историей климата за последние 800 тыс. лет по данным керна антарктического льда со станции Восток со станции Купол-С.

Анализ вейвлетных фазо-частотных характеристик временных рядов динамики

Из представленных выше вейвлетных ФЧХ (фазовых структур) временных рядов следуют следующие закономерности:

1. Изменения всех перечисленных выше климатических переменных происходят по нелинейному полициклическому почти периодическому закону. Положительная фаза каждого мегацикла (ультранизкая частота) на определенных уровнях подвергается процессу бифуркации с разделением исходного мегацикла примерно на две равные составляющие. В приведенных примерах этот процесс повторяется 2-3 раза. В нелинейных автоколебательных системах [Пеллюхова и Фрадкин, 2011] этот процесс называется удвоением периода или делением частоты колебаний. В таблицах 1, 2 и 3 приведены параметры этих циклических процессов.

Таблица 1. Циклическости климатических переменных, средние значения их периодичностей, стандартные отклонения рядов с историей климата в 422 тыс лет (вектор a размерности $M = 300$)

| δD | CH_4 | CO_2 | Инсоляция | Уровень моря | Атмосферная пыль | Толщина льда |
|--|--------|--------|-----------|--------------|------------------|--------------|
| 119,8 | 89,0 | 86,0 | 125,0 | 101,0 | 92,2 | 103,4 |
| 114,8 | 104,6 | 105,2 | 128,8 | 107,2 | 105,4 | 105,8 |
| 130,2 | 90,2 | 94,6 | | 121,6 | 118,2 | 119,0 |
| Средние значения (тыс. лет) | | | | | | |
| 121,6 | 94,7 | 95,3 | 126,9 | 109,9 | 105,3 | 109,4 |
| Стандартные отклонения σ (тыс. лет) | | | | | | |
| 7,86 | 8,58 | 9,62 | 2,69 | 10,57 | 13,0 | 8,4 |

Из таблицы 1 следует, что средние значения периодов изменчивостей исследуемых переменных на уровне $a = 300$ имеют примерно один порядок, около 100 тыс. лет. При этом средние значения периодичностей инсоляции и температуры δD составляют около $126,9 \pm 2,69$ тысяч лет, периодичности атмосферной пыли, уровня моря и толщины льда, - около $105,3 \pm 13$ тысяч лет, а периодичность изменений CH_4, CO_2 составляет около 95 ± 9 тысяч лет. При этом наиболее вариативным является периодичность атмосферной пыли со стандартным отклонением $\sigma = 13,0$ тыс. лет, наименее вариативен периодичность инсоляции с $\sigma = 2,69$ тыс. лет. Вариативности переменных $\delta D, CH_4, CO_2$, и толщины льда примерно одинаковы с $\sigma = 8,0$ тыс. лет в среднем.

Таблица 2. Средние значения периодичностей климатических переменных, соответствующих истории климата 422 тыс. лет в прошлом на разных уровнях масштабирующего параметра a

| a | δD , лет | $\sigma(\delta D)$, лет | CO_2 , лет | $\sigma(CO_2)$, лет | CH_4 , лет | $\sigma(CH_4)$, лет |
|-----|------------------|--------------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|
| 300 | 121600 | 7856 | 95267 | 9617 | 94733 | 8582 |
| 150 | 43889 | 8418 | 49722 | 13909 | 49875 | 15198 |
| 75 | 22711 | 4051 | 2 4024 | 6480 | 25438 | 5778 |
| 35 | 13000 | 3490 | 13426 | 3874 | 12600 | 2719 |

Таблица 3. Средние значения периодичностей климатических переменных: температуры ΔT^0C , углекислого газа CO_2 и метана CH_4 при разных значениях параметра a , соответствующие истории климата 800 тыс. лет в прошлом.

| a | ΔT^0C , лет | $\sigma(\Delta T^0)$, лет | CO_2 , лет | $\sigma(CO_2)$, лет | CH_4 , лет | $\sigma(CH_4)$, лет |
|------|---------------------|----------------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|
| 1000 | 144780 | 35014 | 172200 | 6505 | 176050 | 8403 |
| 500 | 101386 | 15711 | 94863 | 10520 | 96586 | 9152 |
| 300 | 43028 | 9154 | 55307 | 15989 | 51713 | 14406 |
| 150 | 26745 | 7275 | 23824 | 6067 | 25294 | 5081 |

| | | | | | | |
|----|-------|------|-------|------|-------|------|
| 75 | 13429 | 3090 | 13447 | 3451 | 14071 | 3629 |
| 35 | 6494 | 1848 | 6645 | 1788 | 6811 | 1622 |

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между фазовыми структурами климатических переменных на уровне $a = 300$ масштабирующего параметра с историей климата 422 тыс. лет.

| | Инсоляция | δD | Толщина льда | Уровень моря | CH_4 | CO_2 | Пыль |
|------------|-----------|------------|--------------|--------------|--------|--------|-------|
| Инсоляция | 1,00 | -0,45 | -0,26 | -0,27 | 0,07 | 0,04 | 0,32 |
| Пыль | 0,32 | -0,22 | -0,48 | -0,48 | -0,34 | -0,36 | 1,00 |
| δD | -0,45 | 1,00 | 0,40 | 0,37 | 0,19 | 0,20 | -0,21 |
| CH_4 | 0,07 | 0,19 | 0,41 | 0,38 | 1,00 | 0,90 | -0,34 |
| CO_2 | 0,04 | 0,20 | 0,35 | 0,32 | 0,90 | 1,00 | -0,36 |

Таблица 5. Коэффициенты корреляции между исходными климатическими переменными по данным керна из скважины со станции Восток с историей климата 422 тыс. лет.

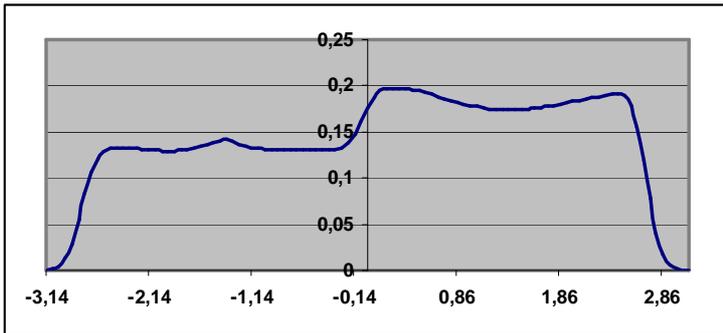
| | Инсоляция | δD | Толщина льда | Уровень моря | CH_4 | CO_2 | Пыль |
|------------|-----------|------------|--------------|--------------|--------|--------|-------|
| Инсоляция | 1,00 | -0,37 | 0,10 | 0,03 | -0,26 | -0,11 | 0,22 |
| Пыль | 0,22 | -0,58 | -0,52 | -0,55 | -0,52 | -0,63 | 1,00 |
| δD | -0,37 | 1,00 | 0,58 | 0,64 | 0,80 | 0,86 | -0,58 |
| CH_4 | -0,26 | 0,81 | 0,64 | 0,69 | 1,00 | 0,78 | -0,52 |
| CO_2 | -0,11 | 0,86 | 0,78 | 0,78 | 0,78 | 1,00 | -0,63 |

Таблицы 4 и 5 коэффициентов корреляций дополняют друг друга и характеризуют степень согласованности изменений климатических переменных за последние 422 тыс. лет. Согласованность изменений климатических переменных хорошо прослеживаются на рисунках 3 (а – ж), в отличие от рисунка 1 (а – ж). Из таблиц 4 и 5 видно, что инсоляция и атмосферная запыленность изменяются однонаправлено с коэффициентом линейной корреляции $r \approx 0,32(0,22)$, в скобках указаны коэффициенты корреляции между исходными временными рядами динамики переменных. Рост инсоляции сопровождается увеличением атмосферной пыли с $r \approx 0,32(0,22)$ и уменьшением атмосферной температуры δD с коэффициентом корреляции $r \approx -0,45(-0,37)$. С увеличением запыленности атмосферы и уменьшением ее температуры, уменьшается уровень моря с коэффициентом корреляции $r \approx -0,27$, уменьшается толщина льда с коэффициентом корреляции $r \approx -0,26$ на уровне мегациклов, уменьшаются концентрации метана CH_4 и углекислого газа CO_2 с коэффициентами корреляции $r \approx -0,26$ и $r \approx -0,11$ соответственно. Увеличение запыленности атмосферы связано, по-видимому, со значительным увеличением осушенных территорий Южного полушария и большой турбулентностью воздушных потоков на этом полушарии [Berger, 1978; Huybers, 2006; Котляков, 2012].

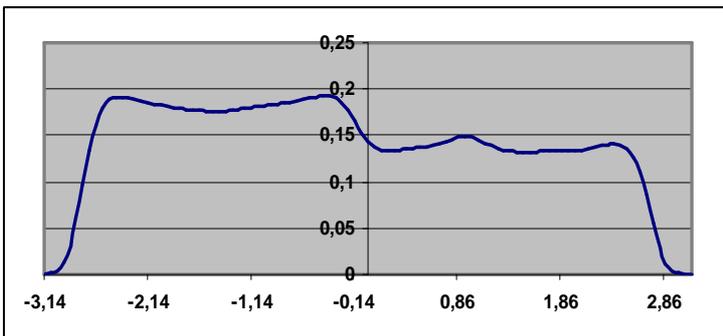
Как видно из таблицы 1 и рисунка 3 (е, ж), в каждом мегацикле метан CH_4 и углекислый газ CO_2 изменяются почти синхронно (на уровне $a = 300$) с разницей менее на одну тысячу лет, что сопоставимо с точностью измерений временной шкалы.

Характерны плотности распределений вейвлетных ФЧХ приведенных выше семи климатических переменных, полученных из анализа керна со станции Восток. Условно их можно разделить на две группы. К первой группе относятся плотности распределений температуры, уровня моря и толщины льда, ко второй, - плотности распределений метана CH_4 , углекислого газа CO_2 , инсоляции и атмосферной пыли. Плотности распределений вейвлетных ФЧХ этих групп антисимметричны: первые имеют положительную асимметрию, вторые - отрицательную. На рисунке 5 (а и б) приведены плотности распределений вейвлетных ФЧХ температуры δD (первая группа) и

метана CH_4 (вторая группа), соответствующие уровню $a = 1000$ (150-180 тысячелетние периодичности мегациклов).



А. Температура δD



Б. Метан CH_4

Рисунок 5. Плотности распределений вейвлетных ФЧХ изменений концентраций дейтерия δD и метана CH_4 (вектор a размерности $M = 1000$), полученных из анализа ледниковых кернов со станции Восток

В первой группе переменных фазы роста более интенсивны (положительные фазы) чем фазы снижения (рис. 5а), а во второй группе, наоборот, - более интенсивны фазы снижения (отрицательные фазы) (рис. 5б). Углы наклона кривых в окрестности нулевой фазы по оси абсциссы характеризуют скорости роста и снижения концентраций переменных. Особенностью изменения атмосферной пыли, плотность распределения вейвлетной ФЧХ которой приводится на рисунке 6, является то, что на этой кривой не обнаруживается всплеск увеличения концентрации пыли в положительной фазе, характерное для всех переменных, принадлежащих второй группе.

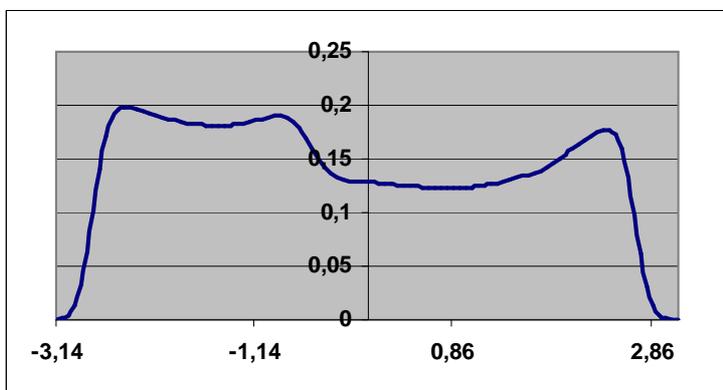


Рисунок 6. Плотность распределения вейвлетной ФЧХ изменений концентраций атмосферной пыли (вектор a размерности $M = 1000$), полученной из анализа ледовых кернов со станции Восток

Особый интерес представляют исследования, связанные с изменчивостью исследуемых климатических переменных относительно изменчивости температуры (дейтерия δD). В таблице 6

приводятся средние значения плотностей распределений разностей вейвлетных ФЧХ дейтерия δD (температуры) и другими климатическими переменными $\Delta G[\zeta_{Темп}(b,a) - \zeta_j(b,a)]$ при разных размерностях M вектора a вейвлет преобразования (1), обозначенные как: $\Delta T^0 - CH_4$, $\Delta T^0 - CO_2$, $\Delta T^0 - Инсоляция$, $\Delta T^0 - Инсоляция$, $\Delta T^0 - Море$, $\Delta T^0 - Пыль$.

Таблица 6. Средние значения плотностей распределений разностей вейвлетных ФЧХ дейтерия δD (температуры) и другими климатическими переменными

| | $\Delta T^0 - CH_4$ | $\Delta T^0 - CO_2$ | $\Delta T^0 - Инсоляция$ | $\Delta T^0 - Инсоляция$ | $\Delta T^0 - Море$ | $\Delta T^0 - Пыль$ |
|-----------------|---------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|
| M = 300 | 1,09 | 0,98 | 1,61 | 0,58 | 0,21 | -0,50 |
| M = 500 | 1,50 | 1,69 | 2,72 | 0,69 | 0,36 | 0,52 |
| M = 1000 | 3,37 | 3,46 | 3,12 | 0,54 | 0,18 | 2,13 |

Из таблицы 6 видно, что в среднем, во всем интервале климатической истории в 422 тыс. лет, при всех значениях параметра вейвлет-преобразования a , кроме $M = 300$ для атмосферной пыли рост температуры опережает рост других климатических переменных, включая метан CH_4 и углекислый газ CO_2 . Величины этих средних максимальны для разности $\Delta T^0 - Инсоляция$ при $M = 300$ и $M = 500$, а при $M = 1000$ максимальна разность $\Delta T^0 - CO_2$.

Интересно решение задачи установления причинно-следственной связи между климатическими переменными по истории климата 422 тыс. лет и в каждые 105,5 тысячилетние интервалы климатических историй. В таблице 7 приведены средние значения плотностей распределений разностей вейвлетных ФЧХ дейтерия δD (температуры) и климатическими переменными (метана CH_4 и углекислого газа CO_2) $\Delta G[\zeta_{Темп}(b,a) - \zeta_j(b,a)]$, обозначенные в таблице 7 как $\Delta T^0 C - CO_2$, $\Delta T^0 C - CH_4$ и $CO_2 - CH_4$, при разных размерностях вектора a вейвлет-преобразования (1) для истории климата 422 тыс лет и в 105,5 - тысячилетних временных интервалах.

Таблица 7. Средние значения плотностей распределений разностей вейвлетных ФЧХ дейтерия δD (температуры) и климатическими переменными

| $\Delta T^0 C - CO_2$ | | | | | |
|-----------------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| | 422-0 тыс. лет | 422-315,5 тыс. лет | 315,5-211 тыс. лет | 211-105,5 тыс. лет | 105,5-0 тыс. лет |
| M = 300 | 0,98 | 1,39 | 0,12 | 0,54 | 1,48 |
| M = 500 | 1,69 | 3,70 | -1,01 | -1,17 | 4,86 |
| M = 1000 | 3,46 | 29,21 | -5,67 | -5,65 | 16,02 |
| $\Delta T^0 C - CH_4$ | | | | | |
| M = 300 | 1,09 | 1,31 | 0,42 | 0,65 | 1,61 |
| M = 500 | 1,50 | 3,33 | -0,73 | -1,31 | 4,33 |
| M = 1000 | 3,37 | 14,88 | -7,17 | -6,40 | 14,56 |
| $CO_2 - CH_4$ | | | | | |
| M = 300 | 0,17 | -0,06 | 0,33 | -0,03 | 0,13 |
| M = 500 | -0,06 | 0,38 | -0,55 | 0,04 | -0,60 |
| M = 1000 | 0,22 | -0,28 | 0,22 | -0,43 | 0,46 |

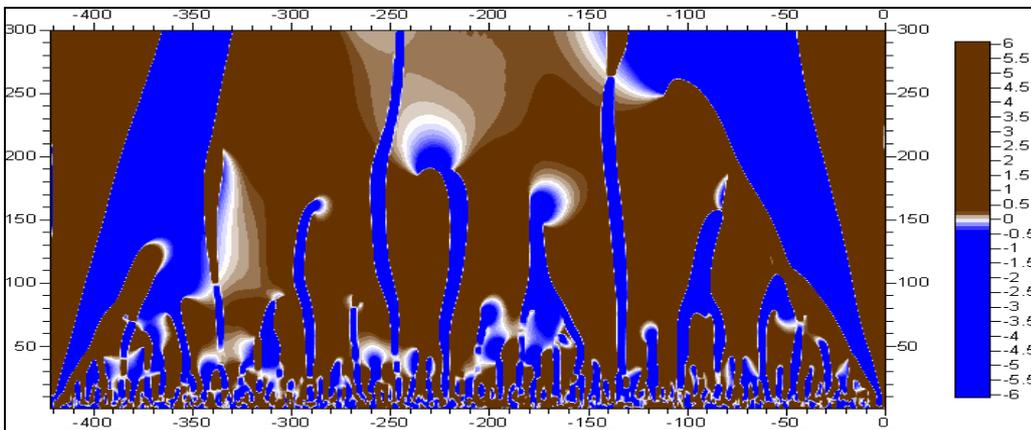
Из таблицы 7 видно, что при значениях параметра $M = 300$, $M = 500$ и $M = 1000$, что соответствует уровням (100-180) тысячилетних периодичностей переменных, фаза роста температуры опережает фазы роста парниковых газов, а рост CO_2 опережает рост метана CH_4 за исключением

значения $M = 500$. Этот результат совпадает с результатами работы [Вакуленко, 2004; Монин, 2005; Мохов, 2005]. При уровне масштаба $M = 300$ вейвлет-преобразования (1) на всех четырех 105,5 – тысячных интервалах в среднем фаза роста температуры опережает фазы роста метана CH_4 и углекислого газа CO_2 , причем это опережение в последней четверти наибольшее, чем в остальных. В этих же интервалах наблюдается колебательный характер изменчивости разности $CO_2 - CH_4$ (опережение фазы роста углекислого газа меняется его небольшим запаздыванием относительно фазы роста метана).

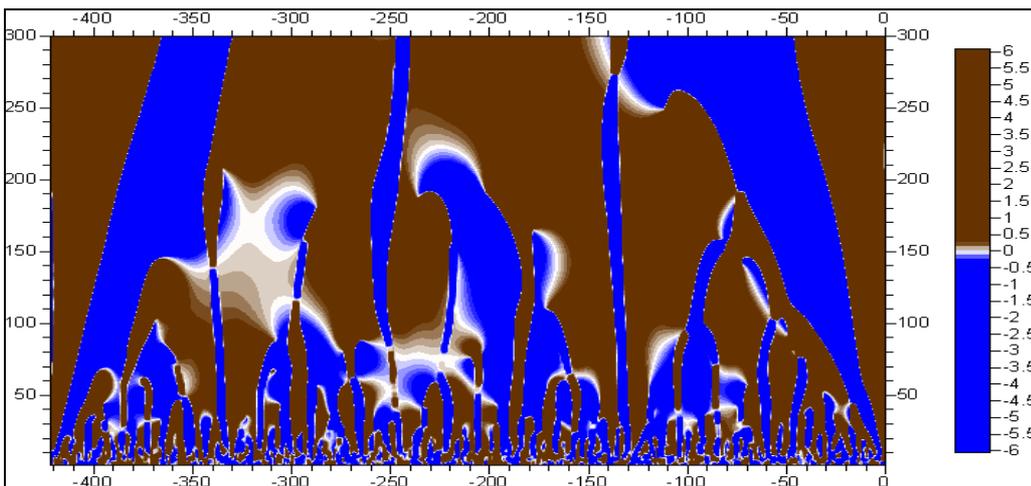
На рисунке 7 приведены структуры вейвлетных ФЧХ разностей $\Delta T^0C - CO_2$, $\Delta T^0C - CH_4$ и $CO_2 - CH_4$ при значении $M = 300$. Аналогичные рисунки получены и для $M = 500$ и $M = 1000$.

В таблице 7 при значениях уровня масштаба $M = 500$ и $M = 1000$ (уровни примерно 120 и 180 тысячелетних периодичностей переменных) в первой и последней четвертях фаза роста температуры опережает фазы роста метана CH_4 и углекислого газа CO_2 , а во второй и третьей четвертях наоборот, фазы роста метана и углекислого газа опережают фазу роста температуры.

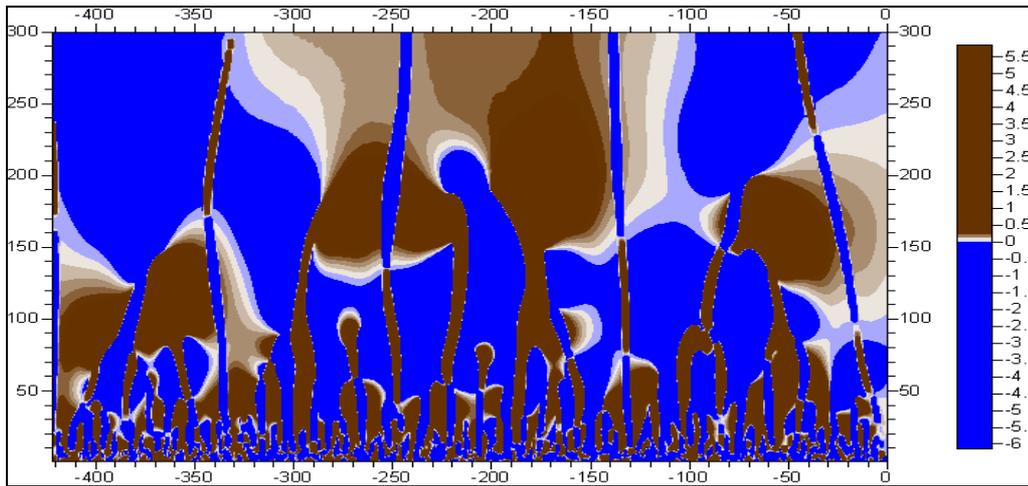
В этих же интервалах средние значения роста разности фаз $CO_2 - CH_4$ изменяются колебательно от положительного в первой четверти к отрицательному во второй четверти и т.д. при $M = 500$ и наоборот, при $M = 1000$.



А. Температуры относительно углекислого газа ($\Delta T^0C - CO_2$)



Б. Температуры относительно метана ($\Delta T^0C - CH_4$)



В. Углекислого газа относительно метана ($CO_2 - CH_4$)

Рисунок 7. Вейвлетные ФЧХ опережений и запаздываний климатических переменных

Из рисунка 7 (а и б) видно, что рост температуры (положительные фазы) опережает рост парниковых газов на низких частотах (периодичности переменных около 105 и 45 тыс. лет). На высоких же частотах (около 23 и 12 тыс. лет), $a = 35$, опережение температуры меняется на запаздывание периодичностью около 12 тыс. лет. Из рисунка 7в видно, что в интервале времени (310 – 40) тыс. лет и $a \approx 50 \div 130$, в прошлом имело место опережение роста углекислого газа росту метана на низких частотах. На частотах около 45 тыс. лет ($a = 100$) в интервале времени с 300 тыс. лет в прошлом по настоящее время в среднем имеет место отставание фазы роста CO_2 относительно фазы роста метана CH_4 . На частотах около 23 тыс. лет ($a = 35$) во всем временном интервале проявляется чередование знака разности фаз ($CO_2 - CH_4$).

В таблице 8 приведены средние значения плотностей распределений вейвлетных ФЧХ дейтерия δD (температуры) и климатическими переменными (метана CH_4 и углекислого газа CO_2) $\Delta G[\zeta_{Temn}(b,a) - \zeta_j(b,a)]$ при разных значениях масштабного параметра a вейвлет-преобразования (1) для истории климата 800 тыс. лет и в 100 тысячилетних временных интервалах.

Таблица 8. Средние значения плотностей распределений вейвлетных ФЧХ дейтерия δD (температуры) и климатическими переменными

| $\Delta T^0 C - CO_2$ | | | | | | | | | |
|-----------------------|----------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| | 800-0 тыс. лет | 800- 700 тыс. лет | 700-600 тыс. лет | 600-500 тыс. лет | 500-400 тыс. лет | 400-300 тыс. лет | 300-200 тыс. лет | 200-100 тыс. лет | 100-0 тыс. лет |
| M = 300 | 0,07 | 0,46 | 0,28 | 0,63 | -1,10 | 0,81 | -0,12 | 0,09 | -0,29 |
| M = 500 | 0,49 | 1,95 | 0,50 | 0,35 | -0,61 | 1,06 | -0,54 | -0,01 | 0,15 |
| M = 1000 | 0,95 | 4,55 | -0,57 | -0,57 | 0,51 | 1,79 | 1,50 | -2,51 | 4,59 |
| $\Delta T^0 C - CH_4$ | | | | | | | | | |
| M = 300 | 0,16 | 1,13 | -0,47 | 0,99 | -0,54 | -0,55 | 0,91 | 0,68 | -0,89 |
| M = 500 | 0,48 | 2,48 | -0,03 | 0,58 | -0,24 | -0,18 | 0,17 | 1,24 | -0,49 |
| M = 1000 | 1,01 | 5,34 | -0,80 | 0,61 | -0,59 | -0,37 | 0,63 | -1,97 | 4,08 |
| $CO_2 - CH_4$ | | | | | | | | | |
| M = 300 | 0,09 | 0,67 | -0,76 | 0,29 | 0,57 | -1,28 | 1,22 | 0,58 | -0,59 |
| M = 500 | 0,08 | 0,66 | -0,44 | 0,51 | 0,31 | -1,21 | 0,50 | 0,98 | -0,64 |
| M = 1000 | -0,06 | 0,69 | -1,24 | 0,23 | -0,19 | -1,05 | 0,37 | 0,64 | -0,46 |

Из таблицы 8 следует, что: а) в среднем, во всем историческом временном интервале 800 тыс. лет фаза роста температуры опережает фазы роста метана CH_4 и углекислого газа CO_2 при размерностях масштабного параметра вейвлета a с $M = 300$, $M = 500$ и $M = 1000$; б) в среднем, фаза роста углекислого газа CO_2 опережает фазу роста метана CH_4 за исключением $M = 1000$; в) в первом 100-тысячии, т.е. в интервале 800-700 тысяч лет в прошлом, фаза роста температуры опережает фазы роста метана CH_4 и углекислого газа, а фаза роста и углекислого газа CO_2 опережает фазу роста метана CH_4 при $M = 300$, $M = 500$ и $M = 1000$; г) во всех других 100-тысячных временных интервалах средние значения фаз роста и падения температуры, метана и углекислого газа изменялись колебательно при всех размерностях масштабирующего параметра a вейвлета.

Вычисления перечисленных выше разностей фаз $\Delta T^0 - CO_2$, $\Delta T^0 - CH_4$ и $CO_2 - CH_4$ изложенным выше методом во временных интервалах (800 – 400) и (400 – 0) тыс. лет показало, что в первом временном интервале (800 – 400) тыс. лет при всех размерностях масштабирующего параметра a ($M = 300$, $M = 500$ и $M = 1000$) в среднем фаза роста температуры опережает фазы роста углекислого газа и метана, а фаза роста углекислого газа опережает фазу роста метана. Во втором временном интервале (400 – 0) тыс. лет при всех размерностях параметра a в среднем фаза роста температуры также опережает фазы роста углекислого газа и метана, а фаза роста углекислого газа в среднем отстает от фазы роста метана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В историческом временном интервале от 422 тыс. до современности выявлены значимые корреляции между временными рядами изменчивостей атмосферной температуры, толщины льда, уровня моря, метана и углекислого газа при вариации инсоляции и атмосферной пыли. Установлено, что периодичности изменений исследуемых временных рядов и их вариации на одном и том же масштабном уровне отличаются друг от друга. При $M = 300$ вектора a с наибольшей периодичностью изменяются дейтерий δD (температура) с периодом $121,6 \pm 8$ тыс. лет и инсоляция с периодом $126,9 \pm 2,7$ тыс. лет, наименьшие периодичности имеют метан и углекислый газ в среднем с периодами 95 ± 9 тыс. лет. Атмосферная пыль изменяется с периодичностью 105 ± 13 тыс. лет с наибольшей вариацией.

Для установления и сравнения изменчивостей временных рядов с использованием вейвлет-преобразования вводится вычисление вейвлетных ФЧХ и разностей вейвлетных ФЧХ временных рядов, вычисляются дифференциальные законы распределений вейвлетных ФЧХ и разностей вейвлетных ФЧХ временных рядов и их средних значений.

В изменчивости переменных температуры, инсоляции, атмосферной пыли, углекислого газа, метана, толщины льда и уровня моря, полученные на станции Восток, установлены две группы антисимметричных друг другу законов распределений вейвлетных ФЧХ. К первой группе относятся вариации температуры, уровня моря и толщины льда с положительной асимметрией, ко второй группе относятся вариации углекислого газа, метана, инсоляции и атмосферной пыли с отрицательной асимметрией. Установлено, что в историческом временном интервале 422 тыс. лет в среднем фаза роста температуры опережает фазы роста всех перечисленных выше переменных при размерностях масштабного параметра a с $M = 300$, $M = 500$ и $M = 1000$ за исключением фазы роста атмосферной пыли при $M = 300$.

При установлении закономерностей опережения или запаздывания температуры, метана и углекислого газа относительно друг друга в историческом интервале от 422 тыс. лет до современности при $M = 300$, $M = 500$ и $M = 1000$ получено, что в среднем фаза роста температуры опережает фазы роста метана CH_4 и углекислого газа CO_2 . Этот результат совпадает с результатами, полученными в работах [Petit, 1999; Вакуленко, 2004; Монин, 2005; Мохов, 2005; Бялко, 2009]. В этом же временном интервале фаза роста углекислого газа опережает фазу роста метана за исключением $M = 500$. Аналогичные исследования проведены в последовательных

временных подинтервалах (422–315,5), (315,5–211), (211–105,5) и (105,5–0) тыс. лет.

Оказалось, что при $M=300$ во всех временных подинтервалах фаза роста опережает фазы роста парниковых газов. Эта же закономерность имеет место в первом и в четвертом подинтервалах при всех значениях a . Но во втором и третьем подинтервалах при $M=500$ и $M=1000$ имеет место опережение фаз роста парниковых газов фазе роста температуры. При всех значениях a наблюдается изменение знака средних значений плотностей распределений разностей $CO_2 - CH_4$ вейвлетных ФЧХ временных рядов от подинтервала к подинтервалу.

Аналогичные 100-тысячелетние подинтервальные вычисления проведены и для исторического интервала от 800 тыс. лет до современности. Получено, что при всех значениях масштабного вектора a с размерностями $M=300$, $M=500$ и $M=1000$ вейвлета, во всем интервале в 800 тыс. лет и в первом подинтервале (800–700) тыс. лет в среднем фаза роста температуры опережает фазы роста парниковых газов. Во всех других 100 – тысячных подинтервалах при разных размерностях вектора a наблюдается чередование знаков разностей фаз $\Delta T^0C - CO_2$, $\Delta T^0C - CH_4$ и $CO_2 - CH_4$. В то же самое время, в подинтервалах (800–400) и (400–0) тыс. лет при всех размерностях вектора a наблюдается в среднем опережение фазы роста температуры фазам роста парниковых газов. При размерностях вектора a с $M=300$, $M=500$ и $M=1000$ вейвлета, в подинтервале (800–400) фаза роста углекислого газа опережает фазу роста метана, а в подинтервале (400–0) наоборот, при всех размерностях вектора a наблюдается в среднем опережение фазы роста метана фазе роста углекислого газа.

Закономерно то (рис. 7), что опережение фазы роста температуры фазам роста парниковых газов является колебательным, но не периодическим на всех уровнях периодичностей климатических переменных. На низких частот опережение фазы роста температуры фазам роста парниковых газов составляет сотни тысяч лет, а на высоких частотах, - сравнимо с точностью измерений временной шкалы и является хаотическим.

Характерна тенденция опережения фазы роста температуры фазам роста парниковых газов в среднем в продолжительных интервалах временных рядов климатических переменных.

Основной вывод. По причине того, что климатические переменные имеют отличающиеся друг от друга периоды колебаний, в особенности, на уровнях низких частот, опережение и запаздывание роста температуры по отношению к росту или запаздыванию парниковых газов является закономерным процессом в климатической системе. На уровнях высоких частот эти колебания учащаются переходя в хаотические. На длинных временных интервалах порядка 400 тыс. лет, в среднем имеет место опережение фазы роста температуры фазам роста парниковых газов.

ЛИТЕРАТУРА

- Berger A. 1978. Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes // Journal Astronomic Sciences. Vol. 3. No. 12. P. 2362-2367.
- Augustin L. et al. 2004. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. Nature. Vol. 429. P. 623-628.
- Fischer H. et al. 1999. Ice core records of atmospheric CO_2 around the last three glacial termination // Science. V. 283. P. 1712-1714.
- Huybers P. 2006. Early Pleistocene glacial cycles and the integrated summer insolation forcing // Science. Vol. 313. P. 508-511.
- Jouzel J. et al. 2007. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the last 800000 years // Science. Vol. 317. P. 793-796.
- NOAA's National climatic data center. URL: www.ncdc.noaa.gov/paleo/icecore/html
- Petit R. et al. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420000 years from the Vostok ice core, Antarctica // Nature. Vol. 399. P. 429-436.
- Алексеев В.И. 2013. Анализ и прогнозирование циклических временных рядов с использованием вейвлетов и нейросетевых нечетких правил вывода // Вестник Югорского государственного университета. Выпуск 3 (30). С. 3-10.
- Алексеев В.И., Полищук Ю.М. 2013. Прогноз изменений температуры по палеоклиматическим данным и инструментальным измерениям на основе методов вейвлет-анализа и нечетких нейронных сетей // Вестник Югорского государственного университета. Выпуск 3 (30). С. 11-14.
- Блаттер К. 2004. Вейвлет-анализ. Основы теории. М.: Техносфера. 280 с.
- Бялко А.В. 2009. Палеоклимат: дополнения к теории Миланковича // Природа. № 12. С. 18-28.

- Вакуленко Н.В. и др. 2004. Доказательство упреждения изменений концентрации парниковых газов вариациями температуры в данных станции "Восток" // Доклады Академии наук. Т. 396. № 5. С. 686-690.
- Дьяконов В.П. 2004. Вейвлеты. От теории к практике. 2-е изд. М.: СОЛОН-Пресс. 400 с.
- Котляков В.М. 2012. История климата Земли по данным глубокого бурения в Антарктиде // Природа. № 5. С. 3-9.
- Котляков В.М. 2000. Избранные сочинения в шести книгах. Книга 1. Гляциология Антарктиды. М: Наука. 432 с.
- Монин А.С., Сонечкина Д.М. 2005. Колебания климата по данным наблюдений. Тройной солнечный и другие циклы. М: Наука. 191 с.
- Мохов И.И., Безверхний В.А., Карпенко А.А. 2005. Диагностика взаимных изменений содержания парниковых газов и температурного режима атмосферы по палеоконструкциям для Антарктической станции Восток // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Том 41. № 5. С. 579-592.
- Пелюхова Е.Б., Фрадкин Э.Е. 2011. Синергетика в физических процессах: самоорганизация физических систем: учебное пособие. 2-е изд. СПб.: Лань. 320 с.

WAVELET PHASE-FREQUENCY ANALYSIS OF CLIMATIC VARIABLES FROM THE RESULTS OF DEEP GLACIAL DRILLING IN ANTARCTICA

Alekseev V.I.

Significant correlation dependence between climatic variables obtained by the analysis of the cores of ice of Antarctica was calculated. Two types of antisymmetric laws of distributions of variability of phases of climate variables were set using multiscale one-dimensional continuous wavelet transform and differential laws of distribution of the wavelet phase transformations of climate variables.

The first group includes the ranks of variability of deuterium (temperature), the thickness of ice and sea level, with a positive asymmetry, the second group is a series of variability of insolation, methane, carbon dioxide and atmospheric dust with negative asymmetry. Calculation of differential distribution of differences of wavelet phase-frequency characteristics of series of temperature and greenhouse gases ($\Delta T^0 C - CO_2$, $\Delta T^0 C - CH_4$), and series of carbon dioxide and methane ($CO_2 - CH_4$) in the historical time intervals between 800 and 422 thousand years up to now in general and time intervals are set in 100, 105,5 and 400 thousandth time intervals in which the average growth phase of temperature is ahead of the growth phase of carbon dioxide and methane, and the phase of growth CO_2 is ahead of the growth phase of CH_4 ; the time intervals in which these conditions are not met were set.

It was set that ahead of the growth phase of temperature phases of growth of greenhouse gases is oscillatory and not periodically at all levels of periodicities of climate variables. Also it was set that ahead of the growth phase of temperature phases of growth of greenhouse gases on average in long intervals of time series of climate variables.

Key words: climate variables, wavelet functions, multiscale wavelet transformation, wavelet phase-frequency analysis differential law of distribution, the phase difference between signals, greenhouse gases.

Поступила в редакцию: 29.04.2014
Переработанный вариант: 5.06.2014