

Т.Е. Данова, Б.В. Перельгин

**РЕЗУЛЬТАТЫ ФУРЬЕ-АНАЛИЗА ДАННЫХ ПАЛЕОРЕКОНСТРУКЦИИ
ТЕМПЕРАТУРЫ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ГРЕНЛАНДИИ**

T. Danova, B. Pereygin

**DATA OF TEMPERATURE PALEORECONSTRUCTION IN CENTRAL PART
OF GREENLAND FOURIER-ANALYSIS RESULTS**

Проведено исследование энергетики гармоник, полученных с помощью Фурье-анализа преобразованного ряда аномалий реконструированной температуры в центральной части Гренландии по данным ледовых кернов. В исследованиях использован преобразованный ряд по сформированной выборке значений температуры воздуха через каждые тридцать лет, для трех временных периодов.

Ключевые слова: ледовые керны, реконструированная температура, Фурье-анализ, гармоники.

Harmonic energy obtained by Fourier-analysis of transformed row of reconstructed temperature anomaly in central part of Greenland by ice kernels data is investigated. For three time periods by formed sample of temperature values transformed row after every 30 years are used in investigation.

Key words: ice kernel, reconstructed temperature, Fourier-analysis, harmonics values.

Введение

С середины прошлого века все большую роль в изучении климатических систем прошлого играет анализ керна из глубоких скважин, пробуренных на ледниках в зонах аккумуляции. Непрерывно совершенствуются способы анализа керна. Анализ ледяного керна и содержания в нем дейтерия, микрочастиц, парниковых газов и изотопов уже позволил оценить изменения температуры воздуха за период около 800 тыс. лет. Детальные палеорекострукции температуры строятся на основе анализа изотопного состава кернов, а именно, процентного содержания тяжелого изотопа кислорода ^{18}O (его среднее содержание в природе — около 0,2 % от всех атомов кислорода). Молекулы воды, содержащие этот изотоп кислорода, тяжелее испаряются и легче конденсируются. Поэтому, например, в водяном паре над поверхностью моря содержание ^{18}O ниже, чем в морской воде. А в конденсации на поверхности формирующихся в облаках снежных кристаллов охотнее принимают участие молекулы воды, содержащие ^{18}O , благодаря чему их содержание в осадках выше, чем в водяном паре, из которого осадки формируются. Чем ниже температура формирования осадков, тем сильнее проявляется данный эффект, то есть тем больше в них ^{18}O . Поэтому, оценив изотопный состав снега или льда, можно оценить и температуру, при которой формировались осадки. Была обнаружена связь между изотопной кривой из гренландской скважины Crete и кривыми температур в Англии и Исландии. Эти

температуры реконструированы для последних 300–500 лет по надежным записям прямых наблюдений за природными процессами [9, 10, 12, 13]. Все это дает основания рассматривать гренландские ледниковые керны в качестве чувствительного естественного регистратора температурных флуктуаций в Северном Полушарии и, в частности, в Европе.

Объекты и исходные материалы исследования

В исследовании будем опираться на данные, полученные от двух наиболее известных из пробуренных в Гренландии за последние четверть века скважин – GRIP и GISP2 [9, 10, 12, 13]. Анализ состояния ледовых кернов дает полную картину об изменениях климата Земли и состоянии атмосферы в прошлом. Сохранившиеся наслоения льда позволяют делать выводы о значениях и ходе температур далеких эпох с 1 % ошибкой. Восстановленная температура воздуха в приземном слое в центральной части Гренландии за последние 50 000 лет была получена на основе анализа стабильных изотопов N_2 и Ar, полученных из ледовых кернов. Она отражает ход зимних значений температуры воздуха, которые, как известно, близки к среднегодовым температурам. Реконструированные данные температуры за последние 50 тысяч лет предоставлены World Data Center for Paleoclimatology, Boulder, USA. Эти данные представляют собой набор особых точек и не являются регулярным дискретным рядом (рис. 1а).

Для исследования был использован преобразованный ряд реконструированных данных температуры примерно за 50 000 лет (точнее – за 49 830 лет). Для этого из исходного ряда была сформирована выборка значений температуры через каждые тридцать лет (по Монину) (рис. 1б). Такой период выборки связан с тем, что смена тенденций в изменении давления и температуры, а соответственно и смена типа атмосферной циркуляции, влекут за собой соответствующие изменения в угловой скорости вращения Земли. А именно при пониженной частоте появления меридиональной формы циркуляции наблюдается ускорение вращения Земли и наоборот [6]. Эта тенденция имеет квазипериодический характер: 30–35 лет. Заметим, что кратные гармоники: $\approx 30 \rightarrow \approx 60$ лет характерны для стерических колебаний уровня Мирового океана, глобальной температуры воздуха и температуры поверхности океана [4].

Температура воздуха за 49 830 лет претерпевала значительные изменения (рис. 1б). Поэтому было принято следующее решение: полученный ряд значений температуры воздуха с дискретностью 30 лет разделить на три части, поскольку целесообразным представляется выделение временных периодов, которым присущи свои колебания и средние значения (рис. 2): ледниковый период, длительностью 35 280 лет (49 830–14 550 лет назад), длина ряда составляет 1176 значений; переходный период, длительностью 4 530 лет (14 550–10 020 лет назад), длина ряда составляет 151 значение; послеледниковый период (наше время), длительностью 10 020 лет (10 020 лет назад – по наше время), длина ряда составляет 334 значения.

Общеизвестно, что любые периодичности колебания атмосферной циркуляции проявляются на протяжении некоторого временного интервала (десятки, тысячи или миллионы лет) и, со временем, изменяются, или исчезают полностью.

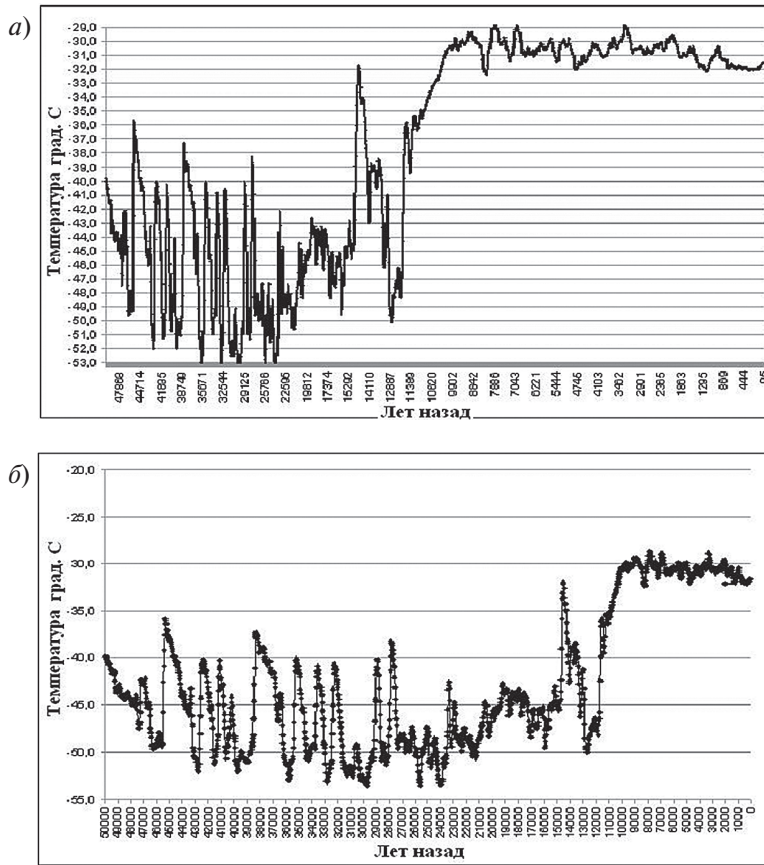


Рис. 1. Реконструированные данные температуры в центральной части Гренландии за последние 50 000 лет (а) и преобразованный ряд реконструированных данных температуры (б) с дискретностью 30 лет (длина ряда составляет 1661 значение).

Каждая цикличность имеет свою меру устойчивости во времени и этим циклам соответствует определенная энергетика, которая зависит от многих внешних и внутренних климатообразующих факторов. Поэтому важной задачей является не только выявление значимых периодов колебаний, но и определение того, какие из этих периодичностей энергетически наиболее ярко проявляются в климатической системе планеты.

Методика исследования

Часто используемое для анализа гидрометеорологических рядов одномерное преобразование Фурье позволяет выделить наиболее значимые периодичности в соответствии с величиной энергии, которая приходится на каждое колебание. Для выявления энергетически наиболее выраженных периодов колебаний к трем анализируемым временным

периодам был применен аппарат спектрального Фурье-анализа математического пакета прикладных программ MATLAB (применена функция FFT пакета SPTool).

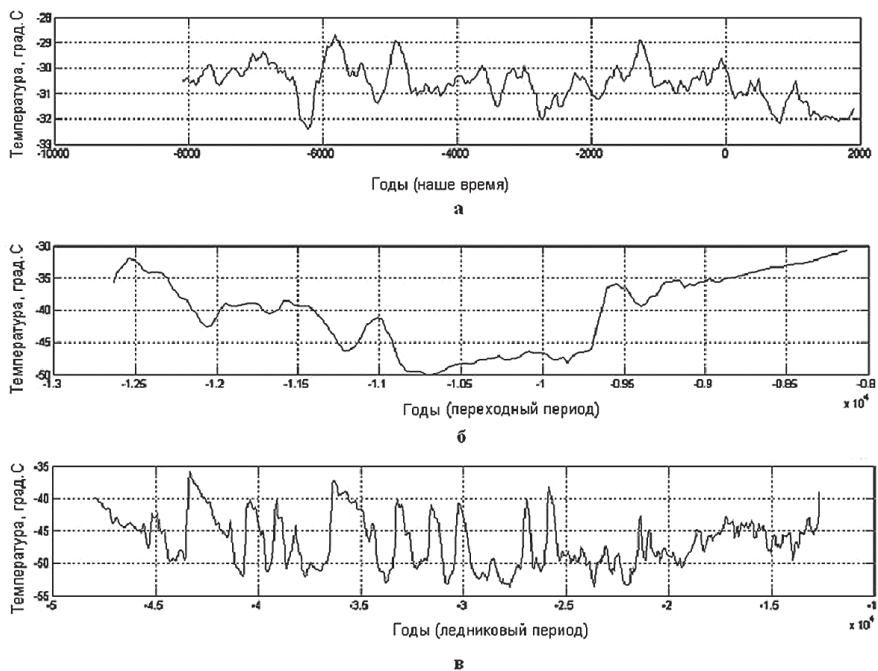


Рис. 2. Преобразованный ряд реконструированных данных температуры в центральной части Гренландии за последние 49 830 лет с дискретностью 30 лет разделенный на три периода (со знаком «→» годы до нашей эры).

Анализ всех трех числовых рядов позволяет прийти к естественному выводу о том, что постоянная составляющая спектра колебаний температуры для всех рядов будет иметь очень большую энергию, на несколько порядков превышающую энергию высокочастотных колебаний. Результаты расчетов показали, что среднее значение температуры для ледникового периода составило $-46,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, для переходного периода составило $-40,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и для нашего времени составило $-30,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На фоне столь мощной постоянной составляющей на полученных спектрах невозможно будет рассмотреть иные, более высокочастотные составляющие. Поэтому для уменьшения в спектре доли постоянной составляющей было решено для каждого из трех временных периодов, определить среднее значение температуры и относительно среднего рассчитать отклонения температур, т.е. аномалии (рис. 3). При проведении исследований осуществлять Фурье-анализ аномалий. При этом полагаем, что во всех трех анализируемых периодах процесс является стационарным.

В результате проведенного Фурье-анализа аномалий всех трех периодов были получены сначала амплитудно-фазовые частотные спектры для каждого из рассматриваемых периодов и на их основе рассчитаны энергетические спектры для всех трех периодов.

Все спектры нормировались по длительности для того, чтобы получить возможность сравнивать их между собой по уровню энергии. По оси ординат всех полученных спектров отложены нормированные значения энергии спектральных компонент, а по оси абсцисс — частоты, представляющие собой обратные значения времени.

При этом максимальная ширина спектра в соответствии с теоремой Котельникова будет определяться половинной частотой самого короткопериодического процесса, которым является шаг ряда равный 30 годам. Таким образом, максимальная ширина спектра составит значение, равное $1/60$, а разрешающая способность спектра составит значение, зависящее от величины выборки, т.е. от длины ряда. При обнаружении моды в спектре легко определить ее периодичность, взяв обратное значение частоты, соответствующей этой моде.

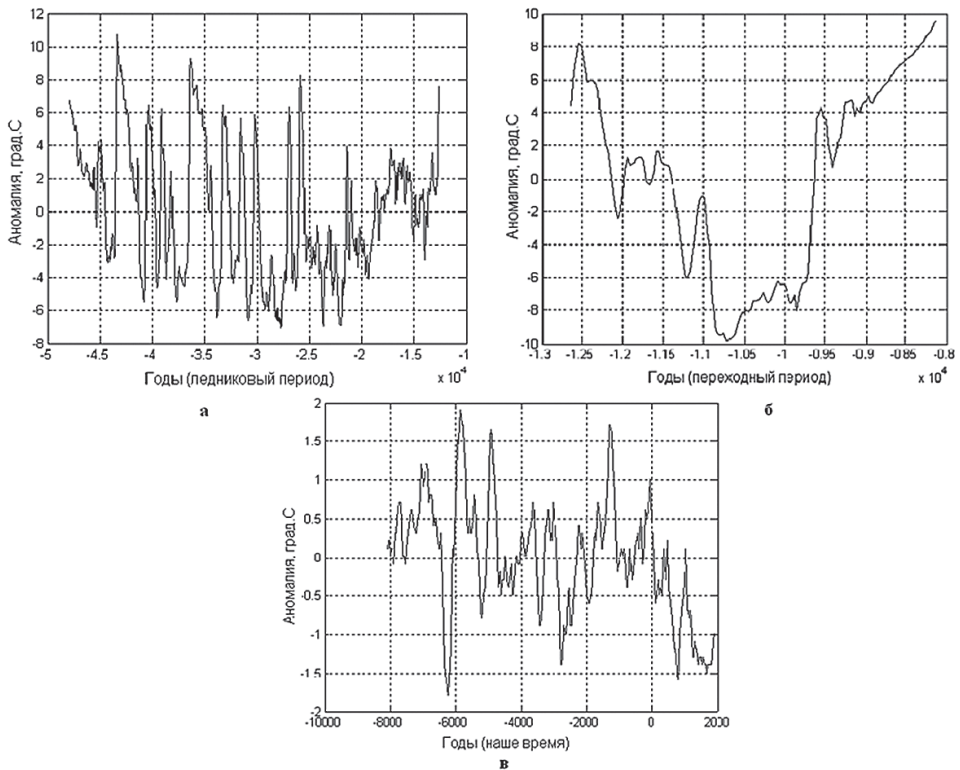


Рис. 3. Ряды аномалий температуры в центральной части Гренландии по трем временным периодам с дискретностью 30 лет.

Обсуждение результатов

Проведенный анализ показал, что большая часть энергетически значимых мод спектров лежит в низкочастотной области. Это связано с тем, что принятое предположение о стационарности процесса внутри каждого из рассматриваемых периодов

не совсем верное. Внутри каждого периода все-таки среднее значение изменяется, что и дает мощный низкочастотный отклик в спектре. Поэтому отображать спектры есть смысл только в их низкочастотной области, т.к. в высокочастотной части спектра моды не видны. При проведении анализа первых 35 280 лет, которые представляют собой ледниковый период, был получен энергетический спектр в его низкочастотной части, приведенный на рис. 4а. Его анализ позволил распределить в порядке уменьшения энергии, следующие колебания. Наибольшую моду (мода 1 величиной 1748) имеет квазивосемнадцатитысячелетнее колебание (17 857 лет) — самое мощное колебание, которое определяется влиянием климатообразующего фактора и, возможно, связано с фазами сжатия и расширения нашей планеты, которые были выявлены Мартьяновым в ходе исследований [5]. Как определил автор, потепления на Земле совпадают с фазой сжатия, а похолодания — с фазами расширения. Эти пульсации наблюдаются с периодичностью приблизительно 20–18 тыс. лет, что хорошо согласуется с результатами нашего анализа.

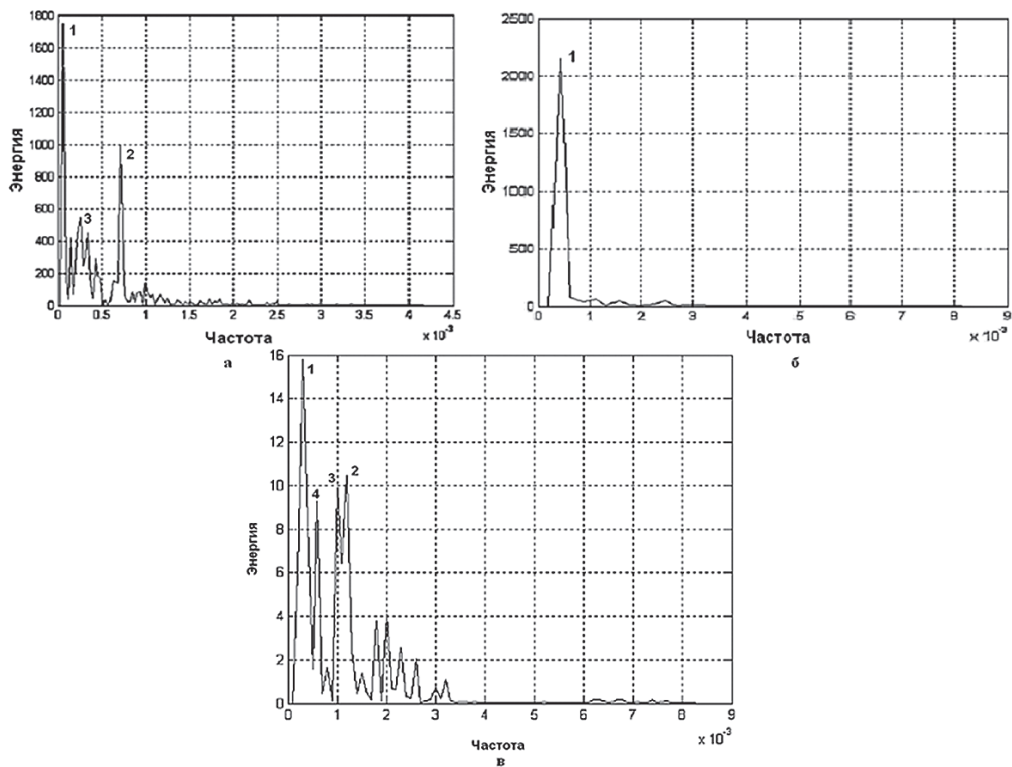


Рис. 4. Низкочастотная часть энергетического спектра аномалий ледникового периода (а), переходного периода (б) и послеледникового периода (в).

Вторым по величине энергии (мода 2 со значением 997) является колебание с периодичностью в 1 408 лет. Меньшим (мода 3 с величиной 543) из наиболее энергетически

значимых колебаний является квазичетырехтысячелетние колебание с периодом в 3 921 год. Особый интерес представляют результаты Фурье-анализа данных, относящихся к переходному периоду (рис. 4б).

При сравнении рис. 4а и 4б можно увидеть значительную разницу в энергиях спектральных мод. Главная мода ледникового периода составляет 80 % от главной моды переходного периода. Это говорит о том, что энергетические изменения в переходный период были более существенными, чем в ледниковый период. Временной отрезок переходного периода представлен устойчивым ростом температуры воздуха с малыми амплитудами колебаний. На этом фоне ярко выделяется резкое изменение температуры воздуха — сначала резкое повышение, а затем резкое понижение в пределах 12–13 тыс. лет тому назад. Этот температурный всплеск может быть обусловлен глобальной катастрофой, связанной с падением космического тела. В результате этой катастрофы в северном полушарии одновременно погибло около 70 % всех растений и животных. В литературе существует много свидетельств об этой катастрофе. В [7] описываются результаты геологических исследований: «В южноамериканских Андах, в горах, на высоте 4200 м, геологи обнаружили следы морских осадков! В том же районе некоторые развалины в Тиуанако (на высоте 4300 м) оказались залитыми двухметровым слоем жидкой грязи, причем источник затопления найти не удалось... Фрагменты скелетов людей и животных, возрастом более 12 тысяч лет лежат в хаотическом беспорядке вместе с обработанными камнями, орудиями, инструментами и бесчисленным количеством других предметов». Так, в Америке более 70 видов крупных млекопитающих вымерли между 15 000 и 8 000 годами до н.э. Однако более 40 млн животных не были равномерно распределены по всему периоду; гибель основной их части приходится на две тысячи лет между 11 000 и 9 000 годами до н.э., известна также, динамика исчезновения видов — в течение предыдущих 300 тысяч лет исчезли всего около 20 видов.

На рис. 4б хорошо видно, что самым важным и максимальным по энергии является колебание с периодом 2 272 года (мода 1), остальные всплески имеют в 43 и более раз меньшую энергию. То, что потепление в переходном периоде не было монотонным, подтверждается детальными палеоклиматическими реконструкциями [1]. Общее повышение температуры прерывалось большими и малыми похолоданиями различной длительности. Два крупных из них, имевших место в период 14–12 тыс. лет назад, получили наименование древний и средний дриас. В кульминацию этих похолоданий ледовитость акватории северного полушария достигала в первом случае 8 баллов, во втором — 6 баллов. Они были расчленены интерстадиалом беллинг, когда ледовитость снижалась до 2 баллов, т.е. до уровня, имевшего место в период потепления раннего средневековья. Это подтверждается данными по деградации ледников на островах Европейской части Арктики и температурной амплитудой, определенной по биологическим индикаторам с учетом влияния континентальных льдов. К освобождению ото льда Арктического бассейна в аллереде (12–11 тыс. лет назад) привел необычайный и ярко выраженный рост температуры поверхностных вод на 6,0–10,0 °С на большей части акватории. Этот факт был установлен с помощью палеотемпературного и микропалеонтологического анализов донных отложений Атлантики. Продолжительность кульминации можно оценить примерно в 500 лет [2].

После переходного периода ближе к нашему времени следует голоцен – типичная межледниковая эпоха с относительно стабильным климатом. Периодизация голоцена на основе схемы Блитта-Сернандера: Субатлантический период (0–2500 лет назад), Суббореальный период (2500–5000 лет назад), Атлантический период (5000–8000 лет назад) – самый теплый и влажный период голоцена, Бореальный и пребореальный периоды (8000–10300 лет назад), Древний голоцен (ранее 10300 лет назад).

Для исследуемой послеледниковой эпохи или нашего времени, которое включает в себя четыре первых из вышеперечисленных периодов, характерным является разнообразие гармоник (рис. 4в). Среди них можно выделить в порядке уменьшения энергии следующие колебания: колебание с периодичностью 3 333 года (мода 1); следующим по значимости фиксируется колебание с периодичностью 833 года (мода 2); далее, проявляется гармоника с периодичностью 1 000 лет (мода 3); фиксируется периодичность в 1 666 лет (мода 4). Оставшиеся более мелкие гармоники имеют амплитуду в 3–5 раз меньшую, чем вышеуказанные.

Результаты расчетов сведены в табл. 1. Курсивом выделены периодичности, которые прослеживаются на протяжении длительного времени и являются наиболее характерными для приземной температуры, полужирным шрифтом – те гармоники, которые нашли свое продолжение в последующем периоде.

Таблица 1

Периодичности процессов, полученные в результате Фурье-анализа

Ледниковый период		Переходный период		Послеледниковый период	
Амплитуда	Период	Амплитуда	Период	Амплитуда	Период
1748	17857				
416	7143				
543	3921				
448	2941			15,8	3333
295	2325	2143	2272		
997	1408			9,3	1666
80	1176				
80	1063				
130	1000			9,9	1000
72	862			10,4	833
		50	645		
40	578				
38	543			4	500
34	458			2,5	435
23	400	50	411	2	385

Сравнительный анализ этих трех периодов позволил выявить некоторые закономерности временной изменчивости в колебательных процессах. Во всех трех рассматриваемых периодах отмечается квазичетырехсотлетнее колебание.

Тысячелетнее и пятисотлетнее колебания характерны как для ледникового, так и для послеледниковых периодов, но не наблюдаются в переходном периоде. Вообще, динамика температуры воздуха в переходном периоде настолько устойчива и однозначна, что многообразия гармоник на протяжении 4,5 тыс. лет не фиксируется. Выявленные гармоники характеризуют, по-видимому, те немногие колебания, которые были присущи климатической системе Земли в переходном периоде. Самым мощным из них является квазидвухтысячелетняя периодичность.

Кроме того, в послеледниковом периоде можно выделить кратные гармоники: 3333 → 1666 → 833 года, а так же: 1000 → 500 лет. Для ледникового периода такая кратность гармоник достаточно условна: 2325 → 1176, 1408 → 2941. Также прослеживаются периодичности близкие к 2,5 тыс. лет (2941 и 2325 лет), эти колебания наиболее близки к периодам вариаций магнитного поля Земли, составляющим 2700 лет. Причем, эта цикличность становится более длительной по времени: приблизительно 45–46 тыс. лет тому она составляла 1500 лет, позднее — 2350 лет, и в последний раз в период максимума оледенения она проявилась как колебание в 2600 лет [5]. Далее, в переходный период, эта гармоника становится практически единственной имеющей максимальную энергию и, следовательно, влияющей на климат той эпохи. Однако в послеледниковый период эта цикличность исчезла и больше не прослеживалась, а появились новые циклы в 1666 и 1000 лет, которые могут быть также связаны с активизацией геологических процессов на планете.

Изменения температуры воздуха в ледниковый период описываются осцилляциями Дансгора-Эшгера, которые характеризуются резкими изменениями климата и представляют высокочастотную цикличность (1000, 1450 и 3000 лет). Во время последнего ледникового периода этих изменений насчитывается 23 (рис. 3б). Эти осцилляции в северном полушарии проявляются в виде быстрого (десятилетия) потепления с последующим постепенным похолоданием (в вековом масштабе). Разница температур во время осцилляции в Гренландии достигала 15,0 °С.

Причины появления этих осцилляций неясны, однако возможна связь с событиями Хайнриха [11] — явлениями нарушения термохалинной циркуляции, вызывавшими похолодание в северном полушарии. События Хайнриха, определяются наличием слоев насыщенных детритом, перенесенным айсбергами, в результате периодической нестабильности ледовых потоков с североамериканского Лаврентийского ледникового щита в течение последних 70–60 тыс. лет и представляют собой цикличность средней периодичности (5000 и 10000 лет) [3].

В переходный период также можно говорить о циклах второго уровня — это многовековые циклы Бонда с периодом 1470 ± 500 лет. Всего в течение современного послеледникового периода было выявлено 8 таких циклов Бонда, и вариации температур в их рамках были весьма значительны (рис. 3а). События Бонда могут также коррелировать с 1800-летним циклом лунных приливов [8], 1850-летний цикл также характерен для колебаний ледников.

По мнению автора [3], в морских осадках Северной Атлантики циклы Дансгора-Эшгера выявлены как циклы Бонда, каждый цикл Бонда заканчивается горизонтом айсберговых осадков, в результате разгрузки Лаврентийского ледникового щита, т.е. событием Хайнриха. Теплая фаза событий Дансгора-Эшгера наступала, когда осаждеие айсберговых отложений заканчивалось. Совпадение событий Дансгора-Эшгера и циклов Бонда говорит о том, что откол айсбергов и в Гренландии и на Лаврентийском щите происходил почти одновременно, в Гренландии как правило, чуть раньше. Безусловно, эти события влияли на климатические условия обоих полушарий.

Заключение

Проведенный Фурье-анализ преобразованного ряда реконструированной температуры в центральной части Гренландии по данным ледовых кернов, позволил сделать следующие выводы:

- 1) деление преобразованного ряда реконструированной температуры в центральной части Гренландии на три временных отрезка, представляется целесообразным, так как это позволило выделить присущие каждому временному периоду колебания и закономерности колебаний;
- 2) наибольшую энергию имеет колебание с периодичностью 17857 лет – самое мощное колебание ледникового периода, которое возможно связано с фазами сжатия и расширения нашей планеты, потепления на Земле совпадают с фазой сжатия, а похолодания – с фазами расширения. Эти пульсации наблюдаются с периодичностью приблизительно 20–18 тыс. лет, что хорошо согласуется с результатами наших расчетов;
- 3) также в ледниковый период прослеживаются гармоника близкие к 2,5 тыс. лет (2941 и 2325 лет), эти колебания наиболее близки к периодам вариаций магнитного поля Земли, составляющим 2700 лет. В переходный период, эта гармоника становится единственной, имеющей максимальную энергию и, следовательно, влияет на климат той эпохи. Однако, в послеледниковый период эта цикличность исчезла и больше не прослеживалась, а появились новые циклы в 1666 и 1000 лет;
- 4) в послеледниковом периоде максимальную энергию имеет гармоника с периодичностью 3333 года, а также прослеживается 1666-летнее колебание, которое вполне соответствует многовековым циклам Бонда, каждое из которых является климатическим событием и возможно, являются следствием изменений в термohалинной циркуляции;
- 5) применение методов Фурье-анализа для ряда аномалий реконструированной температуры воздуха позволило нам выявить только долгопериодические колебания, которым присуща максимальная энергия. Для выявления короткопериодных колебаний, имеющих значительно меньшую энергию, необходимо провести высокочастотную фильтрацию рядов.

Литература

1. *Алейников А.А.* Об основных вопросах изучения четвертичных (антропогенных) отложений Северо-Запада СССР. — Л., 1960, с. 27–33.
2. *Борисов П.М.* Опыт реконструкции ледяного покрова полярного бассейна в поздне- и послеледниковое время. Северный Ледовитый океан и его побережье в кайнозое. // Институт географии АН СССР. — Л.: Гидрометеоздат, 1970, с. 61–70.
3. *Васильчук А.К.* Палинология и хронология повторно-жильных льдов: диссертация доктора геогр. наук. — М., 2009. — 362 с.
4. *Глок Н.И., Малинин В.Н.* Статистический анализ стерических колебаний уровня Мирового океана. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 21, с. 126–137.
5. *Мартьянов Н.Е.* Размышления о пульсациях Земли. — Красноярск: КНИИГиМС, 2003. — 272 с.
6. *Рудяев Ф.И.* Доклад РАН, 1998, т. 357, № 6, с. 823–825.
7. *Тюняев А.* История возникновения мировой цивилизации, системный анализ. — М., 2008. — 739 с.
8. *Bond G. et al.* (1997) «A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates». *Science* 278 (5341): 1257–1266. DOI:10.1126/science.278.5341.1257. Bibcode: 1997Sci...278.1257B.
9. *Grootes P.M., Stuiver M., White J.W.C., Johnsen S.J., Jouzel J.* Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores. // *Nature* 366, 1993, pp. 552–554.
10. *Meese D.A., Alley R.B., Fiacco R.J., Germani M.S., Gow A.J., Grootes P.M., Illing M., Mayewski P.A., Morrison M.C., Ram M., Taylor K.C., Yang Q., Zielinski G.A.* Preliminary depth-agescale of the GISP2 ice core. // Special CRREL Report 94-1, US, 1994.
11. *Primeau F.* Characterizing transport between the surface mixed layer and the ocean interior with a forward and adjoint global ocean transport model. // *Journal of Physical Oceanography*, 35, 2005, pp. 545–564.
12. *Stuiver M., Braziunas T.F., Grootes P.M., Zielinski G.A.* Is there evidence for solar forcing of climate in the GISP2 oxygen isotope record. // *Quaternary Research* 48, 1997, pp. 259–266.
13. *Stuiver M., Grootes P.M., Braziunas T.F.* The GISP2 18O climate record of the past 16,500 years and the role of the sun, ocean and volcanoes. // *Quaternary Research* 44, 1995, pp. 341–354.