

Спектрально-временной анализ длиннопериодных климатических рядов на примере Гренландской скважины

© Т. Е. Данова, Б. В. Перельгин, 2016

Одесский государственный экологический университет,
Одесса, Украина

Поступила 7 мая 2015 г.

Представлено членом редколлегии В. Г. Бахмутовым

Спектрально-часовой анализ гармоник восстановленного ряда температуры воздуха в центральной части Гренландии выявил два периода с максимальными значениями энергии спектра. Показано, что стійко у часі веде себе найменша гармоніка. Всі гармоніки характеризуються максимальними значеннями енергії під час періодів різких змін температури повітря, найменші значення енергії спостерігаються в періоди малих збурень температури.

Ключові слова: відновлений ряд температури повітря, спектрально-часовий аналіз, гармоніки.

Введение. Исследования цикличности глобальной климатической системы связаны с использованием длиннопериодных климатических рядов и базируются на анализе данных палеорекоkonструкций с помощью методов математической статистики. Одним из способов получения длиннопериодных климатических рядов является изучение гляциальных отложений. Анализ ледяного керна дает возможность получить сведения о климатических условиях за длительный период времени. Изучение нивально-гляциальных систем прошлого с помощью ледовых кернов позволяет получить информацию о содержащемся в нем дейтерии, микрочастицах, парниковых газах, изотопах и оценить изменения температуры воздуха за период, охватывающий несколько климатических циклов [Котляков, 2000]. Палеоклиматические работы последних лет свидетельствуют о том, что изменения глобального климата в XX столетии происходили в основном под воздействием естественных причин [Grootes et al., 1993; Meese et al., 1994; Steig et al., 1994; Stuiver et al., 1995, 1997]. Детальные палеорекоkonструкции 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. Оценив изотопный состав снега или льда, можно оценить и температуру, при которой формировались осадки. Так была выявлена связь между изотопной кривой из гренландской скважины Cretе и кривыми температур в Англии и Исландии. Эти температуры реконструированы для последних 300—500 лет по надежным записям прямых наблюдений за природными процессами [Grootes et al., 1993; Stuiver et al., 1995, 1997]. Все это дает основание рассматривать гренландские ледниковые керны в качестве чувствительного естественного регистратора температурных флуктуаций в Северном полушарии и, в частности, в Европе.

Особенность исследования длиннопериодных климатических рядов заключается в свойстве нестационарности этих рядов. В них информативным является сам факт изменения частотно-временных характеристик ряда, отражающий динамику климатических процессов. Часто используемое в исследованиях преобразование Фурье [Schlesinger, Ramankutty, 1994; Minobe, 1997, 1999, 2000; Chao et al., 2000; Man-

tua, Hare, 2002; Кляшторин, Любушин, 2005; Humlum et al., 2011; Данова, Перелыгин, 2013] оказывается недостаточно эффективным при применении его к сложным нестационарным рядам. Например, преобразование Фурье не различает сумму и последовательность синусоид во времени — их спектры практически одинаковы, в результате чего теряется информация о временных характеристиках ряда.

В отличие от гармоник преобразования Фурье, локализованных только в частотной области и предоставляющих информацию только о частотных свойствах сигнала, вейвлет-функции имеют частотно-временную локализацию. Вейвлет-спектр представляет собой трехмерное изображение коэффициентов $W(a, b)$. В климатические исследования вейвлет-анализ был введен рядом авторов [Lau, Weng, 1995; Torrence, Compo, 1997; Baliunas et al., 1997; Isaksen et al., 2005; Butler et al., 2007]. Применение вейвлет-преобразования позволяет выявить и наглядно показать квазипериодическую структуру описываемого ряда, выделить осцилляции не только с хорошо фиксированным периодом, но и нестационарные осцилляции и локализованные периодичности. Так, в работе [Данова, Перелыгин, 2015] вейвлет-анализ дал возможность определить не только масштаб осцилляций, выявить начало и конец конкретной осцилляции, а также уточнить возраст событий Хайнриха и провести сравнение с датировками [Bond, Lotti, 1995; Vidal et al., 1999; Hemming, 2004; Васильчук, 2009]. Использование вейвлет-анализа для долгопериодных климатических рядов позволяет получить более точный возраст отдельных событий в многовековой цепи климатических изменений. Можно взглянуть на исследуемый процесс и с другой точки зрения: наряду с общей картиной, представляющей динамику процесса в целом, можно не только определить точный возраст отдельных осцилляций, но и соотнести их с конкретными климатическими явлениями и оценить энергетику этих явлений. Однако использование вейвлет-анализа для долгопериодных климатических рядов не позволяет проследить динамику во времени наиболее характерных для данного ряда периодичностей. Для этих целей желательно использовать спектрально-временной анализ (СВАН).

СВАН применяется для обнаружения нестационарных сигналов во временных рядах систем геофизического мониторинга [Кляшторин, Любушин, 2005; Minobe, 1997, 1999, 2000]. СВАН нестационарного процесса заключается в оценке текущего спектра части ряда, соответствующего

скользящему временному окну некоторой малой длины. При такой оценке получаем зависимость спектра энергии сигнала как от частоты, так и от положения середины или правого края окна на исследуемом ряде в виде рельефа. Максимальным значениям такой зависимости соответствуют временные интервалы увеличения энергии колебаний в разных частотных полосах, что и подлежит исследованию в настоящей статье.

Используемые данные и методы анализа.

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%-ной ошибкой [Grootes et al., 1993; Meese et al., 1994; Stuiver et al., 1997]. 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 [Монин, 1982]. Реконструированные данные температуры за последние 50 000 лет предоставлены Мировым центром данных палеоклиматологии World Data Center for Paleoclimatology, Boulder, USA (<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/datalist.html>). Эти данные представляют собой набор точек, фиксирующих изменение температуры воздуха в нерегулярные моменты времени.

Для исследования был использован преобразованный ряд реконструированных данных температуры примерно за 50 000 лет (точнее за 49 830 лет). Для этого из исходного ряда на основе интерполяции был сформирован ряд значений температуры воздуха через каждые тридцать лет (рис. 1). Период выборки величиной в 30 лет связан с тем, что смена тенденций в изменении температуры и давления, влекущих за собой смену типа атмосферной циркуляции, приводит к соответствующим изменениям в угловой скорости вращения Земли.

При пониженной частоте появления меридиональной формы циркуляции наблюдается ускорение вращения Земли, и наоборот [Рудяев, 1990]. Эта тенденция имеет квазипериодический характер с примерным периодом в 30—35 лет.

В качестве основного метода исследования в работе использован СВАН — метод исследования нестационарных временных рядов, заключающийся в оценке "текущего" спектра ча-

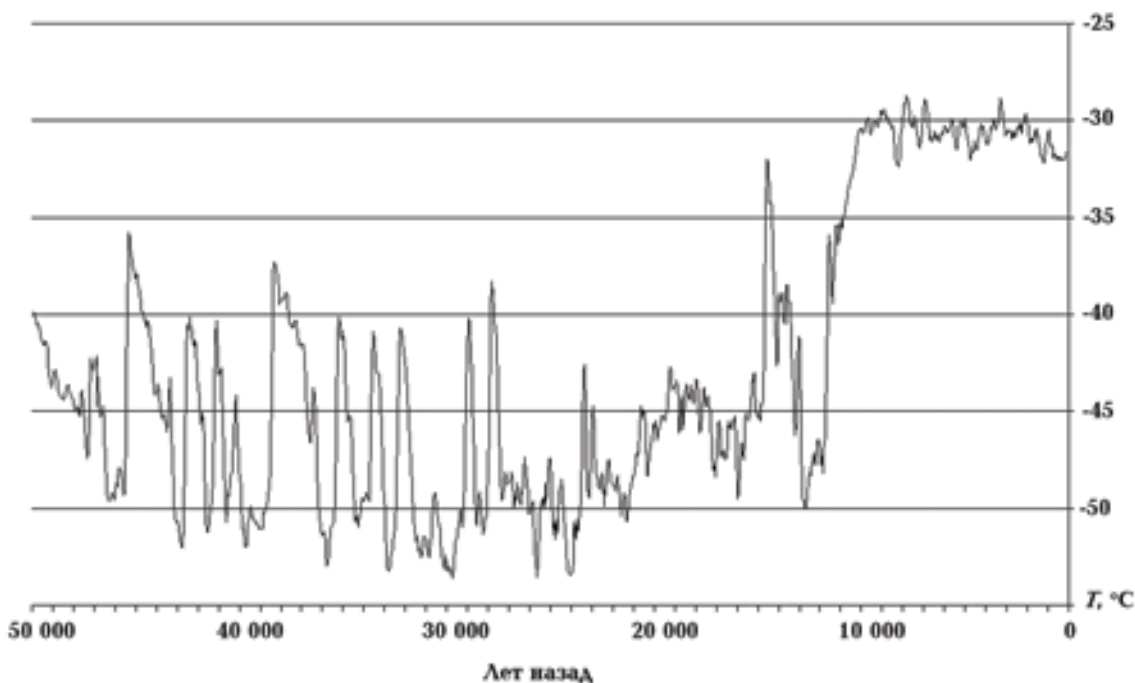


Рис. 1. Преобразованный ряд реконструированных значений температуры в центральной части Гренландии с дискретностью 30 лет.

сти сигнала, соответствующего скользящему временному окну некоторой малой длины. При подобной оценке получается зависимость спектра энергии сигнала как от частоты, так и от положения (середины или правого края) окна. Эта зависимость визуализируется в виде либо двумерных линий уровней, либо трехмерных рельефов, которые называют СВАН-диаграммами (рис. 2).

Максимальным значениям такой зависимости соответствуют периоды времени увеличения энергии колебаний в тех или иных час-

тотных полосах. Применяемое при спектрально-временном анализе преобразование Фурье позволяет вычислить спектральную плотность процесса, представляющего собой функцию времени или пространственных координат.

Поскольку исследуемый ряд представляет собой единственную реализацию случайного процесса, то используем для его анализа непараметрический метод спектрального анализа, т. е. не будем применять методы усреднения спектров, присущие методам параметрического или, как говорят, модельного анализа [Котюк, Цветков, 1970]. В нашем случае непараметрический метод спектрального анализа заключается в применении дискретного преобразования Фурье с помощью системы компьютерной математики MatLab.

При проведении дискретного преобразования Фурье в указанной системе компьютерной математики предполагается, что последовательность отсчетов анализируемого ряда является периодически продолженной вперед и назад во времени [Сергиенко, 2002]. Если значения начальных и конечных отсчетов ряда различаются, то при периодическом повторении на стыках сегментов возникают скачки, из-за которых спектр расширяется. Это явление называется растеканием спектра. Для его уменьшения при дискретном преобразовании Фурье

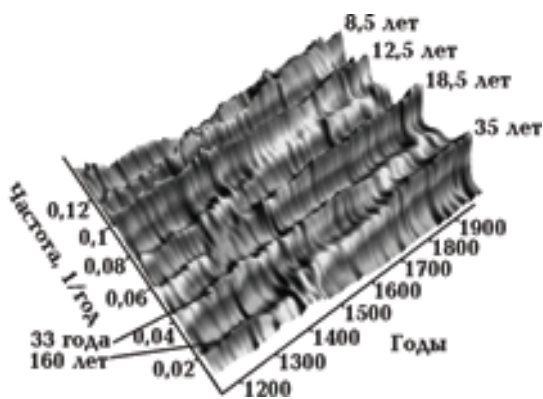


Рис. 2. СВАН-диаграмма [Кляшторин, Любушин, 2005].

применяются весовые функции, называемые также окнами. В этом случае перед расчетом спектра с применением дискретного преобразования Фурье ряд умножается на весовую функцию, которая должна спадать к краям сегмента. Применение операции умножения ряда на функцию окна приводит к тому, что пики, содержащиеся в спектре сигнала, несколько расширяются. Однако при этом становится возможным уменьшение уровня боковых лепестков спектральной функции, что и является в нашем случае целью применения весовой функции. Из всего множества оконных функций для исследуемого ряда целесообразным является использование окна Чебышева. Оно создает незначительное по сравнению с другими окнами (прямоугольным, треугольным, Ханна, Блекмана, Хемминга, Тьюки и др.) расширение главного лепестка спектра [Залманзон, 1989] и позволяет создать наперед заданный малый одинаковый уровень его боковых лепестков (в нашем случае 40 дБ).

При проведении спектрально-временного анализа его результаты отобразим в виде трехмерной СВАН-диаграммы. По оси абсцисс откладывается время, по оси ординат — частота, а вдоль оси аппликата отображается значение энергии спектра. Строится спектрограмма следующим образом. Временное окно величиной в заданное количество отсчетов ряда смещается вдоль ряда слева направо с заданным шагом. Для каждого шага рассчитывается спектр энергии фрагмента ряда, попавшего в окно. Полученный спектр энергии разворачивается вдоль оси ординат со значением абсциссы, соответствующей положению середины окна. Форма окна имеет форму весовой функции Чебышева. Ось абсцисс проградуирована номерами отсчетов исходного ряда, причем в начале и в конце оси введены нулевые значения длительностью в целую часть полуширины окна, поскольку исходный ряд никак не дополнялся. Ось ординат имеет максимальное значение частоты, определяемое значением шага ряда во времени $1/30 \text{ год}^{-1}$. Минимальное значение частоты на оси ординат определяется размером окна и равно максимальному значению частоты, деленному на величину окна. В результате получается зависимость оценки спектра энергии от двух параметров в виде рельефа, а именно, от частоты и положения временного окна. Прослеживая хребты на рельефе, можно получить представление о том, как интенсивность проявления той или иной цикличности изменялась с течением времени (см. рис. 2).

Так, в работе [Кляшторин, Любушин, 2005] СВАН-анализ температуры воздуха за 1500-летний период по данным гренландских кернов [Dansgaard et al., 1975] позволил выявить, что интенсивность климатических циклов значительно изменяется во времени. Периодичность 160 лет хорошо выражена с начала 1200-х до конца 1300-х годов, после чего исчезает, интенсивность 55-летней периодичности непрерывно нарастает с 1500-х и достигает максимального уровня к концу 1900-х годов. Второй по интенсивности является периодичность 30—32 года. Существование именно этих климатических периодичностей (50—70 и 30 лет), выявляемых при изучении различных процессов, подтверждается в ряде работ [Schlesinger, Ramankutty, 1994; Minobe, 1997, 1999, 2000; Chao et al., 2000; Mantua, Hare, 2002; Глок, Малинин, 2011; Данова, 2011].

Анализ тысячелетних изменений климата по данным GISP2 ^{18}O , представленный в работе [Stuiver et al., 1995], показал наличие ярко выраженных периодичностей в диапазоне 830—1050 лет. Вейвлет-анализ GISP2 [Humlum et al., 2011] также показал доминирующие периодичности 1130—1140, 790—770, 560—590 и 390—360 лет. В работах [Bond et al., 1997, 2001] выделена хорошо выраженная периодичность ~ 1500 лет, которая носит название циклов Бонда и определяется во время голоцена в основном по материалам флуктуаций в обломках айсбергового льда. События Бонда могут быть межледниковыми аналогами осцилляций Дансгора—Эшгера 1470-летней цикличности с амплитудой около 15—20% от ледниково-доледникового температурного изменения [Dansgaard et al., 1984]. Таким образом, для климатических изменений наиболее характерна периодичность $\approx 1470 \pm 500$ лет [Stuiver et al., 1995; Grootes et al., 1993]. Кроме того, в работе [Bond, Lotti, 1995] показано, что для климатических изменений также характерны цикличности с периодом 2000—3000 лет.

Ранее примененные методы Фурье-анализа [Данова, Перельгин, 2013] и вейвлет-анализа [Данова, Перельгин, 2015] к преобразованному ряду реконструированных значений температуры за ~ 50 000 лет в центральной части Гренландии также позволили выделить основные гармоники с периодами в 2500, 1500, 1000 и 450 лет. Сравнивая результаты приведенных выше работ, можно сделать заключение, что, несмотря на различные ряды, используемые для выявления значимых периодичностей, получены близкие значения периодичностей.

Анализировать СВАН-диаграмму на 50 000-летнем отрезке времени, учитывая, что за этот период времени наблюдалось огромное количество гармоник, крайне неудобно. Поэтому проводился анализ изменения энергии спектра каждой интересующей нас гармоники отдельно. В качестве анализируемых выбраны гармоники с периодичностями в 2500, 1500, 1000 и 450 лет.

Обсуждение результатов исследования.

Определим временное окно для каждой из выбранных гармоник величиной, равной длительности гармоники. Смещать окно вдоль ряда слева направо будем с заданным шагом, равным одному отсчету, т. е. 30 годам. Анализу подлежит только траектория смещения во времени максимального значения энергетического спектра, присущего данной гармонике (фактически моды). Учитывая, что в качестве шага избран один отсчет, равный 30 годам (значение дискретности преобразованного ряда), в результате визуализации данных расчетов получим график изменения максимального значения энергетического спектра, выявляющий все тонкости динамики выбранной гармоники во времени.

Выберем первую, подлежащую анализу 2500-летнюю гармонику. Периодичности, близкие к 2,5 тыс. лет, прослеживаются на протяжении 35 280 лет: с 49 830 по 14 550 лет назад. В период с 14 550 по 10 020 лет назад эта гармоника становится практически единственной, имеющей максимальную энергию и, следовательно, влияющей на климат той эпохи. В послеледниковый период эта цикличность исчезла и больше не прослеживалась [Данова, Перельгин, 2013].

Анализ динамики 2500-летней гармоники показал ярко выраженную периодичность (рис.

3, а). Выявлено наличие двух отрезков времени, когда данная гармоника имела максимальную энергию, а также отрезок времени, когда максимальная энергия гармоники была незначительной.

Первый период максимума энергии (~ 220) закончился около 35 300 лет назад. Как известно, достоверность реконструкций древнего климата определяется степенью надежности реконструкций физико-географических обстановок, существовавших в условиях подобного климата длительное время и отразившихся на состоянии животного мира и растительного покрова [Величко, Ясаманов, 1986]. Следовательно, необходимо соотнести выявленную динамику гармоник с существующими показателями климатической изменчивости.

На температурной шкале (см. рис. 1) период максимума энергии спектра 2500-летней гармоники характеризуется резкими колебаниями температуры ~ 10,0 °С и описывается наиболее суровой фазой последнего вюрмского оледенения, однако для южных районов Европы в этот период отмечается проявление Молого-Шекнинского межледниковья (Брянский интерстадиал). Так, в работе [Величко, 1968] показана динамика накопления лессов Русской равнины, которая свидетельствует о резком увеличении интенсивности их накопления в период после 35 000 лет назад. Время от 32 до 24 тысячелетий назад было наиболее теплым, это находит подтверждение при анализе расселения человека в Северной Евразии [Величко и др., 2003; Долуханов, 2008], а также в распространении широколиственных лесов [Лазуков и др., 1981]. Таким образом, первый максимум энергии при-

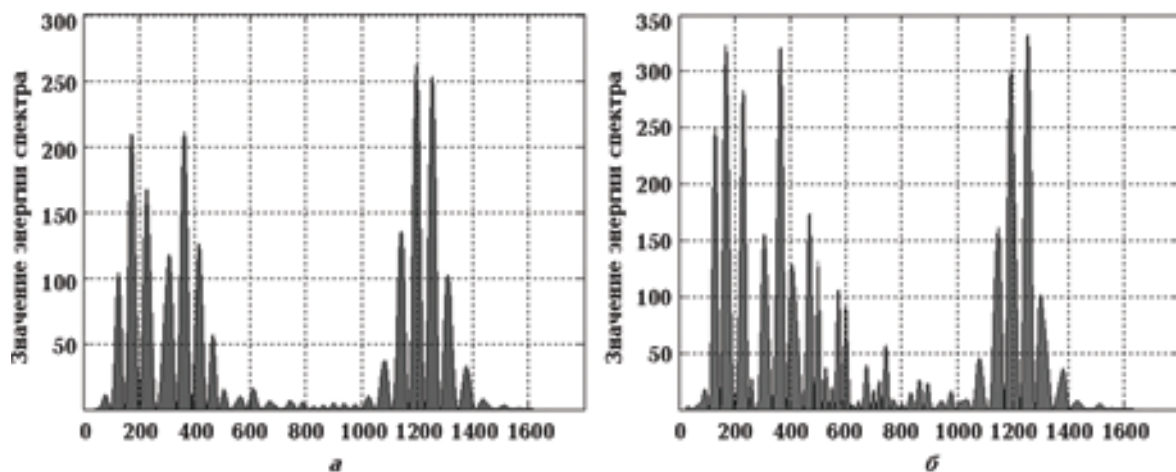


Рис. 3. Изменение энергии спектра 2500-летней гармоники (а), 1500-летней гармоники (б).

ходится на время резких колебаний температуры с большой амплитудой ($\sim 10,0^\circ\text{C}$), характеризующееся быстрым повышением температуры (~ 100 лет), а затем падением на протяжении нескольких сотен лет.

Далее следовал отрезок времени с 28 000 по 18 600 лет назад, когда максимальная энергия 2500-летней гармоник была незначительной (см. рис. 3, а). На температурной шкале (см. рис. 1) этому периоду времени соответствуют колебания температуры с небольшой амплитудой ($\sim 2,0\text{—}5,0^\circ\text{C}$). Теплое молодошекснинское время сменилось примерно 20—18 тысячелетий назад похолоданием, когда разросшийся скандинавский ледниковый покров достиг своего максимального развития. Это был период поздневалдайского оледенения, время устойчиво низких температур [Величко, 1991; Ehlers, Gibbard, 2004; Mangerud et al., 2004]. Данные современных исследований свидетельствуют о том, что предельная граница распространения валдайского оледенения шла в широтном направлении от Вильнюса к Смоленску, а затем на северо-запад к Рыбинскому водохранилищу, озеру Кубенскому и горе Нядома. Позднюю стадию Валдайского покровного оледенения характеризует Осташковское оледенение [Шварцман, Болотов, 2008].

Второй отрезок времени, когда 2500-летняя гармоника имела максимальную энергию (~ 250), начинался около 18 600 лет назад. После 10 000 лет назад энергия этой гармоник резко снижается практически до нулевых значений. Именно этот временной отрезок выделяется стремительным падением температуры. Начало события соответствует периоду 12 850 лет назад, а конец — 11 450 лет назад (см. рис. 1). Конец позднего дриаса датируется возрастом примерно 11 550 лет назад, оцененным с помощью различных методов [Taylor, 1997; Spurk, 1998; Hughen, 2000; Rapp, 2009]. Фактически, окончание этого периода соответствует началу самого теплого и влажного периода голоцена — Атлантическому периоду согласно периодизации голоцена на основе модифицированного варианта широко известной шкалы (схемы) Блитта—Сернандера. Она построена на результатах исследований торфяников Дании, которые провели норвежец Аксель Блитт (1876) и швед Рутгер Сернандер (1910), и представляет собой последовательность основных климатических событий (по мнению авторов схемы, периодов), имевших место в Северной Европе с конца позднего неоплейстоцена и до настоящего времени. Периодизация голоцена для Северной Евразии

была уточнена Н.А. Хогинским [Хогинский, 1987]. Таким образом, второй максимум энергии 2500-летней гармоник приходится на период, когда на общем фоне устойчивого повышения температур наблюдалось стремительное падение температуры, называемое поздним дриасом и являющимся в геохронологии завершающим этапом последнего оледенения [Монгайт, 1973].

Следующая гармоника, подлежащая анализу, соответствует 1500 годам и представляет высокочастотную цикличность, называемую осцилляциями Дансгора—Эшгера, которые описывают изменения температуры воздуха в ледниковый период, характеризующиеся резкими изменениями климата [Rapp, 2009]. Общая картина, определяющая динамику максимальной энергии спектра 1500-летней гармоник, очень близка к 2500-летней, однако значения энергии спектра больше (320—330), а колебания имеют плавные переходы (рис. 3, б). Тот факт, что 1500-летняя гармоника характеризуется большими значениями энергии спектра, чем 2500-летняя, подтверждается ее выявлением при исследовании длиннопериодных рядов с различной дискретностью [Dansgaard et al., 1984; Grootes et al., 1993; Stuiver et al., 1995; Bond et al., 1997, 2001].

Первый максимум энергии спектра (~ 320) наблюдается от 46 300 до 26 800 лет назад, второй максимум энергии спектра (~ 330) — от 18 600 до 7800 лет назад. Оба максимума соответствовали времени резких колебаний температуры с большой амплитудой. Период наименьших значений максимальной энергии спектра 1500-летней гармоник хорошо выражен в пределах от 26 800 до 18 600 лет назад.

Приблизительно такие же временные промежутки соответствуют периодам максимумов и минимумов 1000-летней гармоник (рис. 4, а). Отличия наблюдаются только в значениях энергии для первого (~ 350) и второго максимума (~ 320). Изменения энергии спектра 450-летней гармоник также соответствуют общей картине, но эта гармоника проявляет себя более ровно на протяжении всего последнего ледникового периода (рис. 4, б). Максимальные значения энергии спектра в ледниковый период соответствуют ~ 200 , во время второго периода максимумов наблюдается резкий, как и во всех других гармониках, скачок энергии (~ 320) в пределах 14 300 лет назад. Эта дата характеризует окончание последнего ледникового максимума, начало которого относится ко времени около 26—20 тыс. лет назад.

Заключение. Проведенный спектрально-временной анализ характерных для восстановлен-

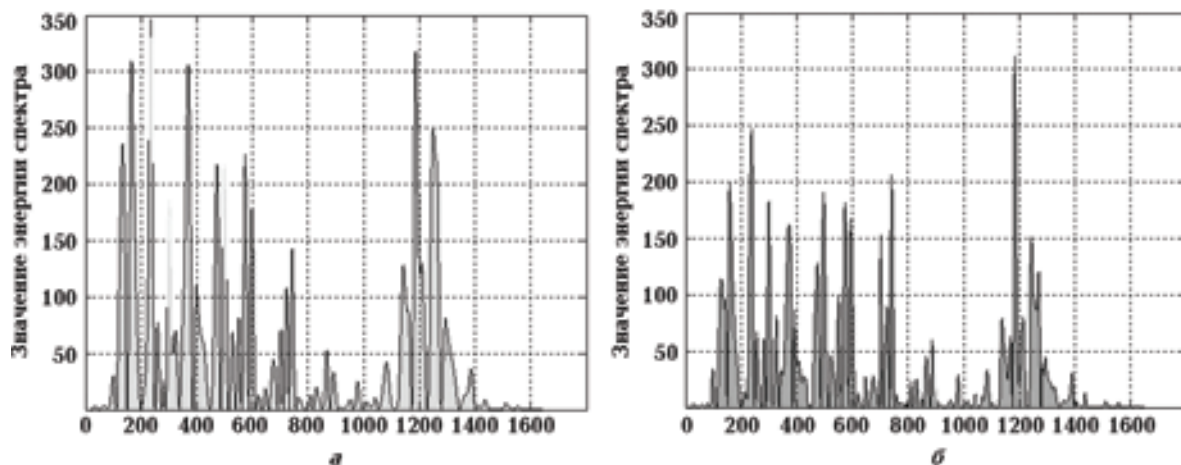


Рис. 4. Изменение энергии спектра 1000-летней гармоник (а), 450-летней гармоник (б).

ного ряда температур воздуха центральной части Гренландии гармоник (с периодичностью в 2500, 1500, 1000 и 450 лет) показал, что для динамики всех гармоник характерными являются два периода с максимальными значениями энергии спектра. Все гармоники характеризуются максимальными значениями энергии в периоды скачкообразных изменений температуры воздуха и, наоборот, наименьшие значения энергии наблюдаются в периоды малых температурных возмущений.

Для всех гармоник выявлена закономерность, наблюдающаяся в ледниковый период — с уменьшением периода гармоник увеличивается про-

должительность максимальных значений энергии (от ~ 10 000 лет для 2500-летней гармоник до ~ 23 000 лет для 450-летней). Второй период максимума для всех гармоник наблюдается в один и тот же промежуток времени, имеет одинаковую продолжительность и характеризуется наибольшими значениями энергии. На протяжении 50 000 лет более устойчиво ведет себя наименьшая гармоника — 450-летняя, несмотря на то, что для реализации ее максимумов необходимо больше энергии, чем для 2500-летней гармоник.

Последние 8000 лет для всех исследуемых гармоник характерны небольшие значения энергии спектра.

Список литературы

- Васильчук А.К. Палинология и хронология повторно-жильных льдов: Дис. ... д-ра геогр. наук. Москва, 2009. 362 с.
- Величко А.А. Главный климатический рубеж и этапы плейстоцена. *Изв. АН СССР. Сер. геогр.* 1968. № 3. С. 5—17.
- Величко А.А. Глобальные изменения климата и реакция ландшафтной оболочки. *Изв. АН СССР. Сер. геогр.* 1991. № 5. С. 5—21.
- Величко А.А., Ясаманов Н.А. Современный и древний климат. *Изв. АН СССР. Сер. геогр.* 1986. № 6. С. 5—15.
- Величко А.А., Грибченко Ю.Н., Куренкова Е.И. Позднепалеолитический человек заселяет Русскую равнину. *Природа*. 2003. № 3. С. 52—60.
- Глок Н.И., Малинин В.Н. Статистический анализ стерических колебаний уровня Мирового океана. *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. Научно-теоретический журнал*. 2011. № 21. С. 126—137.
- Данова Т.Е. Взаимосвязь региональных климатических индексов и динамики морского льда арктического бассейна. *Региональные проблемы*. 2011. Т. 14. № 1. С. 42—47.
- Данова Т.Е., Перельгин Б.В. Применение вейвлет-анализа для уточнения возраста событий Хайнриха. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 1. С. 165—175.
- Данова Т.Е., Перельгин Б.В. Результаты Фурье-анализа данных палеорекострукции температуры в центральной части Гренландии. *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. Науч-*

- но-теоретический журнал. 2013. № 32. С. 83—93.
- Долуханов П. М. Эволюция природной среды и раннее расселение человека в Северной Евразии. В кн.: *Путь на север: Окружающая среда и самые ранние обитатели Арктики и Субарктики*. Москва: Изд-во РАН, 2008. С. 33—47.
- Залманзон Л. А. Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. Москва: Наука, 1989. 496 с.
- Кляшторин Л. Б., Любушин А. А. Циклические изменения климата и рыбопродуктивности. Москва: ВНИРО, 2005. 235 с.
- Котляков В. М. Глобальные изменения за четыре климатических цикла по гляциологическим данным. *Материалы гляциологических исследований*. 2000. Вып. 89. С. 106—111.
- Котюк А. Ф., Цветков Э. И. Спектральный и корреляционный анализ нестационарных случайных процессов. Москва: Изд-во комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1970. 103 с.
- Лазуков Г. И., Гвоздовер М. Д., Рогинский Я. Я. *Природа и древний человек*. Москва: Мысль, 1981. 223 с.
- Монгайт А. Л. Археология Западной Европы. Каменный век. Москва: Наука, 1973. 355 с.
- Монин А. С. Введение в теорию климата. Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. 246 с.
- Рудяев Ф. И. Влияние аномального гравитационного поля Земли на циркуляционные системы атмосферы. *Докл АН*. 1990. Т. 310. № 6. С. 1345—1448.
- Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. Санкт-Петербург: Питер, 2002. 608 с.
- Хотинский Н. А. Голоцен Северной Евразии. Москва: Наука, 1987. 198 с.
- Шварцман Ю. Г., Болотов И. Н. Пространственно-временная неоднородность таежного биома в области плейстоценовых материковых оледенений. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2008. 263 с.
- Baliunas S., Frick P., Sokoloff D., Soon W., 1997. Time scales and trends in the Central England Temperature data (1659—1990): a wavelet analysis. *Geophys. Res. Lett.* 24(11), 1351—1354.
- Bond G., Lotti R., 1995. Iceberg Discharges into the North Atlantic on Millennial Time Scales During the Last Glaciation. *Science* 267, 1005—1010. doi:10.1126/science.267.5200.1005.
- Bond G., Kromer B., Beer J., Muscheler R., Evans M. N., Showers W., Hoffmann S., Lotti-Bond R., Hajdas I., Bonani G., 2001. Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate During the Holocene. *Science* 294, 2130—2136.
- Bond G., Showers W., Cheseby M., Lotti R., Almasi P., deMenocal P., Priore P., Cullen H., Hajdas I., Bonani G., 1997. A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates. *Science* 278, 1257—1266. doi:10.1126/science.278.5341.1257.
- Butler C. J., Garcia-Suarez A., Palle E., 2007. Trends and cycles in long Irish meteorological series. *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy* 107B(3), 157—165.
- Chao Y., Ghil M., McWilliams J. C., 2000. Pacific interdecadal variability in this century's sea surface temperatures. *Geophys. Res. Lett.* 27(15), 2261—2264.
- Dansgaard W., Johnsen S. J., Clausen H. B., Dahl-Jensen D., Gundestrup N., Hammer C. U., Oeschger H., 1984. North Atlantic climatic oscillations revealed by deep Greenland ice cores. *Geophysical Monograph* 29, 288—298.
- Dansgaard W., Johnsen S. J., Reeh N., Gundestrup N., Clausen H. B., Hammer C. U., 1975. Climatic changes, Norsemen and modern man. *Nature* 255, 24—88.
- Ehlers J., Gibbard P. L., 2004. Quaternary Glaciations: Extent and Chronology 2: Part II. North America. Amsterdam: Elsevier. ISBN 0-444-51462-7.
- Grootes P. M., Stuiver M., White J. W. C., Johnsen S. J., Jouzel J., 1993. Comparison of oxygen isotope records from the GIP2 and GRIP Greenland ice cores. *Nature* 366, 552—554.
- Hemming S. R., 2004. Heinrich events: massive late Pleistocene detritus layers of the North Atlantic and their global climate imprint. *Rev. Geophys.* 42, RG1005. doi:10.1029/2003RG000128.
- Hughen K. A., 2000. Synchronous Radiocarbon and Climate Shifts During the Last Deglaciation. *Science* 290, 1951—1954. doi:10.1126/science.290.5498.1951.
- Humlum O., Solheim J.-E., Stordahl K., 2011. Identifying natural contributions to late Holocene climate change. *Global and Planetary Change* 79, 145—156.
- Isaksson E., Divine D., Kohler J., Martma T., Pohjola V., Motoyama H., Watanabe O., 2005. Climate oscillations as recorded in Svalbard ice core $\delta^{18}\text{O}$ records between AD 1200 and 1997. *Geografiska Annaler* 87A(1), 203—214.
- Lau K.-M., Weng H., 1995. Climate signal detection using wavelet transform: how to make a time series sing. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 76(12), 2391—2402.
- Mangerud J., Ehlers J., Gibbard P., 2004. Quaternary Glaciations: Extent and Chronology 1: Part I.

- Europe. Amsterdam: Elsevier. ISBN 0-444-51462-7.
- Mantua N.J., Hare S.R., 2002. The Pacific Decadal Oscillation. *J. Oceanography* 58, 35—44.
- 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., 1994. Preliminary depth-agescale of the GISP2 ice core. Special CRREL Report 94—1, US.
- Minobe S., 1997. A 50—70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophys. Res. Lett.* 24, 683—686.
- Minobe S., 1999. Resonance in bi-decadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: role in climatic region shifts. *Geophys. Res. Lett.* 26, 855—858.
- Minobe S., 2000. Spatio-temporal structure of the pentadecadal oscillations over the North Pacific. *Progress in Oceanography* 47, 381—408.
- Rapp D., 2009. Ice Ages and Interglacials: Measurements, Interpretation and Models. New York: Springer-Verlag, 285 p.
- Schlesinger M.E., Ramankutty N., 1994. An Oscillation in the global climate system of period 65—70 years. *Nature* 367, 723—726. doi:10.1038/367723a0.
- Spurk M., 1998. Revisions and extension of the Hohenheim oak and pine chronologies: New evidence about the timing of the Younger Dryas/Preboreal transition. *Radiocarbon* 40(3), 1107—1116.
- Steig E.J., Grootes P.M., Stuiver M., 1994. Seasonal precipitation timing and ice core records. *Science* 266, 1885—1886.
- Stuiver M., Grootes P.M., Braziunas T.F., 1995. The GISP2 ¹⁸O climate record of the past 16,500 years and the role of the sun, ocean and volcanoes. *Quaternary Res.* 44, 341—354.
- Stuiver M., Braziunas T.F., Grootes P.M., Zielinski G.A., 1997. Is there evidence for solar forcing of climate in the GISP2 oxygen isotope record. *Quaternary Res.* 48, 259—266.
- Taylor K.C., 1997. The Holocene-Younger Dryas transition recorded at Summit, Greenland. *Science* 278, 825—827. doi:10.1126/science.278.5339.825.
- Torrence C., Compo G.P., 1997. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 79(1), 61—78.
- Vidal L., Schneider R.R., Marchal O., Bickert T., Stocker T.F., Wefer G., 1999. Link between the North and South Atlantic during the Heinrich events of the last glacial period. *Climate Dynamics* 15(12), 909—919. doi:10.1007/s003820050321.

Spectral-temporal analysis of long-period climatic series, the core of the Greenland borehole as an example

© T.E. Danova, B.V. Perelygin, 2016

Spectral-temporal analysis of harmonics of restored series of air and temperature in the central part of Greenland has revealed two periods with the maximal values of energy of the spectrum. It has been shown that the least value harmonic behaves stably in time. All harmonics are characterized by the maximal values of energy during the periods of spasmodic variations of air temperature, the least values of energy are observed during the periods of small temperature disturbances.

Key words: the restored series of air temperature, spectral-temporal analysis, harmonics.

References

- Vasilchuk A.K., 2009. Palynology and chronology of ice wedges: Dr. geograph. sci. dis. Moscow, 362 p. (in Russian).
- Velichko A.A., 1968. Main climatic border and stages of pleistocene. *Izvestiya AN SSSR. Ser. geograf.* (3), 5—17 (in Russian).

- Velichko A.A., 1991. The Global changes of climate and reaction of landscape shell. *Izvestiya AN SSSR. Ser. geograf.* (5), 5—21 (in Russian).
- Velichko A.A., Gribchenko Yu.N., Kurenkova E.I., 2003. Late paleolithic of persons populates the Russian plain. *Nature* (3), 52—60 (in Russian).
- Velichko A.A., Yasamanov N.A., 1986. Modern and ancient climate. *Izvestiya AN SSSR. Ser. geograf.* (6), 5—15 (in Russian).
- Glok N.I., Malinin V.N., 2011. Statistical analysis of steric fluctuations in the level of the oceans. *Scientific notes of Russian State Hydrometeorological University. Scientific and technical journal* (21), 126—137 (in Russian).
- Danova T.E., 2011. Intercommunication of regional climatic indexes and dynamics of marine ice of arctic pool. *Regionalnyye problemy* 14(1), 42—47 (in Russian).
- Danova T.E., Perelygin B.V., 2015. Application of wavelet-analysis for clarification of age of events of Heinrich. *Geofizicheskii zhurnal* 37(1), 165—175 (in Russian).
- Danova T.E., Perelygin B.V., 2013. Results of Fur'e analysis of information of paleoreconstruction of temperature are in central part of Greenland. *The Scientific messages of the Russian state hydrometeorological university. Science magazine* (32), 83—93 (in Russian).
- Dolukhanov P.M., 2008. Evolution of the natural environment and early settling apart of man in North Eurasia. In: *The way to the north: the Environment and the earliest inhabitants of the Arctic and Subarctic*. Moscow: Publ. House RAS, 33—47 (in Russian).
- Zalmanzon L.A., 1989. Transformation of Fur'e, Walsh, Haar and their application in a management, connection and other areas. Moscow: Science. 496 p. (in Russian).
- Klyashtorin L.B., Lyubushin A.A., 2005. Cyclic climate change and fish. Moscow: VNIRO, 235 p. (in Russian).
- Kotlyakov V.M., 2000. Global changes in four climatic cycles of glaciological data. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy* (is. 89), 106—111 (in Russian).
- Kotyuk A.F., Tsvetkov E.I., 1970. Spectral and correlation analysis of nonstationary casual transients. Moscow: Publishing House of committee of standards, measures and measuring devices at Council of Ministers of the USSR, 103 p. (in Russian).
- Lazukov G.I., Gvozdover M.D., Roginskiy Ya.Ya., 1981. Nature and ancient man. Moscow: Mysl', 223 p. (in Russian).
- Mongayt A.L., 1973. Archaeology of Western Evropy. Stone age. Moscow: Nauka, 1973. 103 p. (in Russian).
- Monin A.S., 1982. Introduction to the theory of climate. Leningrad: Gidrometeoizdat, 246 p. (in Russian).
- Rudyaev F.I., 1990. Effect of the anomalous Gravity Field the Circulators of the atmosphere system. *Doklady AN* 357(6), 823—825 (in Russian).
- Sergiyenko A.B., 2002. Digital signal processing. St. Petersburg: Piter, 2002. 608 p. (in Russian).
- Khotinskiy N.A., 1987. Holocene Northern Eurasia. Moscow: Nauka, 198 p. (in Russian).
- Shvartsman Yu.G., Bolotov I.N., 2008. Spatio-temporal heterogeneity of the taiga bioma in area of the pleistocene mainland freezings. Ekaterinburg: Publ. Ural Branch of the RAS, 263 p. (in Russian).
- Baliunas S., Frick P., Sokoloff D., Soon W., 1997. Time scales and trends in the Central England Temperature data (1659—1990): a wavelet analysis. *Geophys. Res. Lett.* 24(11), 1351—1354.
- Bond G., Lotti R., 1995. Iceberg Discharges into the North Atlantic on Millennial Time Scales During the Last Glaciation. *Science* 267, 1005—1010. doi:10.1126/science.267.5200.1005.
- Bond G., Kromer B., Beer J., Muscheler R., Evans M. N., Showers W., Hoffmann S., Lotti-Bond R., Hajdas I., Bonani G., 2001. Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate During the Holocene. *Science* 294, 2130—2136.
- Bond G., Showers W., Cheseby M., Lotti R., Almasi P., deMenocal P., Priore P., Cullen H., Hajdas I., Bonani G., 1997. A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates. *Science* 278, 1257—1266. doi:10.1126/science.278.5341.1257.
- Butler C.J., Garcia-Suarez A., Palle E., 2007. Trends and cycles in long Irish meteorological series. *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy* 107B(3), 157—165.
- Chao Y., Ghil M., McWilliams J. C., 2000. Pacific interdecadal variability in this century's sea surface temperatures. *Geophys. Res. Lett.* 27(15), 2261—2264.
- Dansgaard W., Johnsen S.J., Clausen H.B., Dahl-Jensen D., Gundestrup N., Hammer C.U., Oeschger H., 1984. North Atlantic climatic oscillations revealed by deep Greenland ice cores. *Geophysical Monograph* 29, 288—298.
- Dansgaard W., Johnsen S.J., Reeh N., Gundestrup N., Clausen H.B., Hammer C. U., 1975. Climatic changes, norsemen and modern man. *Nature* 255, 24—88.

- Ehlers J., Gibbard P.L., 2004. Quaternary Glaciations: Extent and Chronology 2: Part II. North America. Amsterdam: Elsevier. ISBN 0-444-51462-7.
- Grootes P.M., Stuiver M., White J.W.C., Johnsen S.J., Jouzel J., 1993. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores. *Nature* 366, 552—554.
- Hemming S.R., 2004. Heinrich events: massive late Pleistocene detritus layers of the North Atlantic and their global climate imprint. *Rev. Geophys.* 42, RG1005. doi:10.1029/2003RG000128.
- Hughen K.A., 2000. Synchronous Radiocarbon and Climate Shifts During the Last Deglaciation. *Science* 290, 1951—1954. doi:10.1126/science.290.5498.1951.
- Humlum O., Solheim J.-E., Stordahl K., 2011. Identifying natural contributions to late Holocene climate change. *Global and Planetary Change* 79, 145—156.
- Isaksson E., Divine D., Kohler J., Martma T., Pohjola V., Motoyama H., Watanabe O., 2005. Climate oscillations as recorded in Svalbard ice core $\delta^{18}\text{O}$ records between AD 1200 and 1997. *Geografiska Annaler* 87A(1), 203—214.
- Lau K.-M., Weng H., 1995. Climate signal detection using wavelet transform: howtomake a time series sing. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 76(12), 2391—2402.
- Mangerud J., Ehlers J., Gibbard P., 2004. Quaternary Glaciations: Extent and Chronology 1: Part I. Europe. Amsterdam: Elsevier. ISBN 0-444-51462-7.
- Mantua N.J., Hare S.R., 2002. The Pacific Decadal Oscillation. *J. Oceanography* 58, 35—44.
- 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., 1994. Preliminary depth-agescale of the GISP2 ice core. Special CRREL Report 94—1, US.
- Minobe S., 1997. A 50—70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophys. Res. Lett.* 24, 683—686.
- Minobe S., 1999. Resonance in bi-decadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: role in climatic region shifts. *Geophys. Res. Lett.* 26, 855—858.
- Minobe S., 2000. Spatio-temporal structure of the pentadecadal oscillations over the North Pacific. *Progress in Oceanography* 47, 381—408.
- Rapp D., 2009. Ice Ages and Interglacials: Measurements, Interpretation and Models. New York: Springer-Verlag, 285 p.
- Schlesinger M.E., Ramankutty N., 1994. An Oscillation in the global climate system of period 65—70 years. *Nature* 367, 723—726. doi:10.1038/367723a0.
- Spurk M., 1998. Revisions and extension of the Hohenheim oak and pine chronologies: New evidence about the timing of the Younger Dryas/Preboreal transition. *Radiocarbon* 40(3), 1107—1116.
- Steig E.J., Grootes P.M., Stuiver M., 1994. Seasonal precipitation timing and ice core records. *Science* 266, 1885—1886.
- Stuiver M., Grootes P.M., Braziunas T.F., 1995. The GISP2 ^{18}O climate record of the past 16,500 years and the role of the sun, ocean and volcanoes. *Quaternary Res.* 44, 341—354.
- Stuiver M., Braziunas T.F., Grootes P.M., Zielinski G.A., 1997. Is there evidence for solar forcing of climate in the GISP2 oxygen isotope record. *Quaternary Res.* 48, 259—266.
- Taylor K.C., 1997. The Holocene-Younger Dryas transition recorded at Summit, Greenland. *Science* 278, 825—827. doi:10.1126/science.278.5339.825.
- Torrence C., Compo G.P., 1997. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 79(1), 61—78.
- Vidal L., Schneider R.R., Marchal O., Bickert T., Stocker T.F., Wefer G., 1999. Link between the North and South Atlantic during the Heinrich events of the last glacial period. *Climate Dynamics* 15(12), 909—919. doi:10.1007/s003820050321.