

УДК 551.583.7:681.332.5

ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНОГО РЯДА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЛЕОРЕКОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ГРЕНЛАНДИИ

Т.Е. Данова¹, Б.В. Перелыгин²

¹*Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь, 299911, Россия*

²*Одесский государственный экологический университет, г. Одесса, 65016, Украина*

Аннотация

Представлены исследования преобразованного ряда реконструированных данных температуры воздуха в центральной части Гренландии с дискретностью 30 лет. Стационаризация ~ 50000-летнего ряда реконструированной температуры воздуха в центральной части Гренландии по данным ледовых кернов проведена по математическому ожиданию. Для получения оценки математического ожидания процесса использовалась процедура сглаживания методами скользящего среднего и вейвлет-анализа. Преобразование Фурье применялось многократно к стационаризируемому ряду, каждый раз изменялось время осреднения при сглаживании. Для проведения исследований выбраны три значения времени осреднения: ~ 400–500 лет, ~ 2000 лет и ~ 4000 лет. Стационаризация ряда реконструированных температур методом вейвлет-преобразования показала лучшие результаты со временем осреднения ~ 400 и ~ 2000 лет, тренды хорошо характеризуют исходный ряд температур, выявляя основные закономерности его динамики. Использование периода со временем осреднения ~ 4000 показало худший результат, при осреднении произошла потеря значительных событий основного ряда температур. Полученные нами результаты хорошо согласуются с известной цикличностью в климатической системе планеты, выявленные моды 1470 ± 500 лет сопоставимы с осцилляциями Дансгора – Эшгера и Бонда.

Ключевые слова: ледовые керны, нестационарный ряд, тренд, стационаризация, гармонический анализ

Введение

В метеорологических и климатических исследованиях применение математических методов играет ключевую роль. Обработываемые данные в этих отраслях геофизической науки чаще всего представлены в виде полей или рядов наблюдений. Как правило, они нестационарные и отражают процессы взаимодействия природных факторов [1]. В настоящее время, когда явно изменяется климат, в исследованиях в данной предметной области вполне оправдано применение методов спектрального и, как частный случай, гармонического анализа данных для выявления энергетически наиболее выраженных периодов колебаний в исследуемых полях и рядах наблюдений [1]. В строгом математическом смысле гармонический анализ есть частный случай спектрального разложения функции, которое понимается как разложение в ряд по собственным функциям

некоторого линейного оператора или в интеграл по системе функций, зависящей от непрерывно изменяющегося аргумента [2]. Поэтому под гармоническим анализом здесь понимаем оценивание частот, амплитуд и фаз ряда гармонических компонент (ряда Фурье), на которые раскладывается анализируемая функция. Под спектральным анализом понимаем оценку частотных зависимостей спектральных плотностей амплитуды, фазы или мощности в интеграле Фурье функции на континууме частот [2].

С середины прошлого века все большую роль в изучении климатических систем прошлого играет анализ керн из глубоких скважин, пробуренных на ледниках в зонах аккумуляции. Непрерывно совершенствуются способы анализа керн. Анализ ледяного керн 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 [3–6]. Все это дает основания рассматривать гренландские ледниковые керны в качестве чувствительного естественного регистратора температурных флуктуаций в Северном полушарии и, в частности, в Европе.

1. Объекты и исходные материалы исследования

В исследовании авторы опирались на данные, полученные от двух наиболее известных из пробуренных в Гренландии за последние четверть века скважин – GRIP и GISP2 [3–6]. 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 [3–6]. Восстановленная температура воздуха в приземном слое в центральной части Гренландии за последние 50000 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 [7]. Реконструированные данные температуры за последние 50 тыс. лет предоставлены Мировым центром данных по палеоклиматологии (г. Боулдер, США). Эти данные представляют

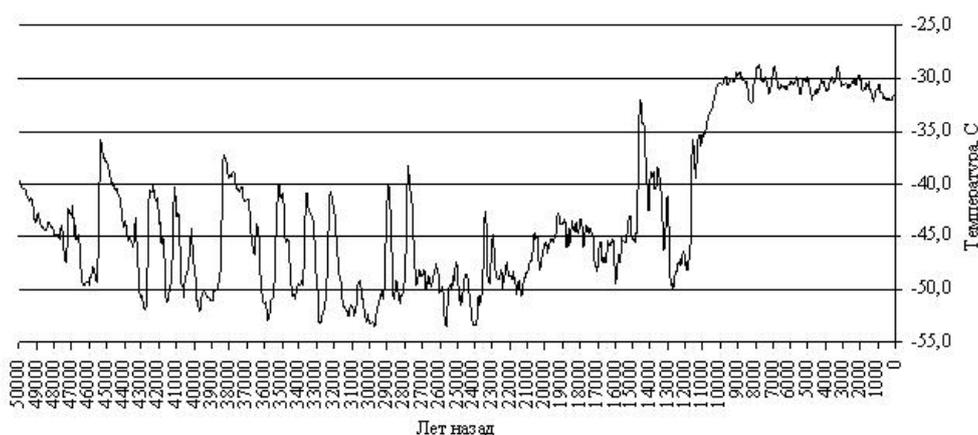


Рис. 1. Преобразованный ряд реконструированных данных температуры в центральной части Гренландии с дискретностью 30 лет

собой набор особых точек и не являются регулярным дискретным рядом. Для исследования был использован преобразованный ряд реконструированных данных температуры примерно за 50000 лет (точнее – за 49830 лет). Для этого из исходного ряда была сформирована выборка значений температуры через каждые тридцать лет [7] (рис. 1). Такой период выборки связан с тем, что смена тенденций в изменении давления и температуры, влекущая 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, эта тенденция имеет квазипериодический характер в 30–35 лет, кратные гармоники с периодами ~30–60 лет характерны для глобальной температуры воздуха и температуры поверхности океана [8]. Температура воздуха за 49830 лет претерпела значительные изменения (рис. 1).

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

2. Методика исследования

Часто используемое для гармонического анализа гидрометеорологических рядов одномерное преобразование Фурье позволяет выделить наиболее значимые периодичности в соответствии с величиной энергии, которая приходится на каждое колебание. Предположение о стационарности исследуемого ряда при проведении гармонического анализа приводит к получению в спектре постоянной составляющей, которая по мощности на 4–5 порядков превышает интересующие

исследователя спектральные составляющие [9]. Гармонический анализ аномалий температур всего ряда, как это принято в климатологии и метеорологии, также проблемы не решает, так как интересующие исследователя спектральные компоненты оказываются на 3–4 порядка меньше постоянной составляющей. Разбиение всего ряда аномалий температур на крупные геологические периоды опять же проблемы не решает, так как ряд остается по математическому ожиданию нестационарным, и, следовательно, от постоянной составляющей, на 2–3 порядка превышающей исследуемые спектральные компоненты, избавиться не удастся. Кроме того, возникают потери в спектральных компонентах из-за разбиения исследуемого ряда. Поэтому появляется потребность в переходе к методу Фурье-фильтрации исходного ряда температур или ряда температурных аномалий. В этом случае из-за дискретности ряда также возникают сложности с выбором функции взвешивания временных отсчетов при фильтрации.

Анализ реконструированного температурного ряда (рис. 1) позволяет сделать вывод о том, что этот ряд является случайным процессом, поскольку невозможно проследить характер причинно-следственных связей изменения температуры в источнике. Необходимость использования для описания ряда теории случайных процессов обуславливается природой климатических процессов и недостатком априорных сведений о последних [1]. Случайность процесса складывается из двух компонент – быстрых изменений и медленных изменений значений температуры. Медленные изменения значений температуры имеют длительный период изменения и в общем можно их полагать модулирующей функцией или трендом случайного процесса [10]. Подобный подход к случайному процессу, с точки зрения его характеристик, позволяет отнести его к классу нестационарных случайных процессов, поскольку не выполняются условия стационарности ни в узком смысле (статистические характеристики устойчивы и зависят только от временных сдвигов и не зависят от самих значений времени), ни в широком смысле (моментная функция первого порядка постоянна и моментная функция второго порядка зависит только от временных сдвигов и не зависит от самих значений времени) [11]. Поскольку предполагается проводить гармонический анализ нестационарного случайного процесса, для получения спектральных характеристик, отображающих временные изменения процесса или его текущие свойства, можно воспользоваться мгновенным спектром мощности $G(\omega, t)$ процесса $\xi(t)$, в соответствии с которым [12]:

$$G(\omega, t) = \frac{\partial}{\partial t} |S_t(\omega)|^2, \quad (1)$$

где

$$|S_t(\omega)|^2 = \int_0^t \xi(t) e^{-j\omega t} dt = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_t^{(i)}(\omega)|^2 \quad \text{и} \quad S_t^{(i)}(\omega) = \int_0^t X_i(t) e^{-j\omega t} dt,$$

$X(t)$ – реализация случайного процесса, в нашем случае она одна.

Решая вопрос о допустимости определения спектральной функции $G(\omega, t)$ по одной реализации, для рассматриваемого случая необходимо знать, относится ли исследуемый процесс к классу, характеризующемуся свойством обобщенной эргодичности, поскольку при определении текущих значений характеристик нестационарных процессов усреднением по времени имеют место принципиальные

ограничения точности оценки. Поэтому при разделении нестационарных случайных процессов на два вида – допускающих и не допускающих оценку с помощью усреднения по времени – вводят критерий. Этим критерием является средний квадрат ошибки δ . Для процесса с обобщенной текущей эргодичностью эта ошибка, включающая в себя текущие ошибки из-за конечности интервала наблюдения, из-за смещенности оценки, из-за изменения вида функции $s(t)$, описывающей временную зависимость исследуемой характеристики от реализации к реализации, обозначенная как $\delta_{f \min}^t$ должна быть меньше некоторого порогового значения среднего квадрата ошибки $\delta_{\text{пор}}$. Процессы с обобщенной текущей эргодичностью характеризуются медленной нестационарностью. Это дает возможность довести интервал усреднения до достижения значения ошибки $\delta_{f \min}^t < \delta_{\text{пор}}$. Таким образом, процесс с обобщенной текущей эргодичностью должен удовлетворять условию

$$R(t) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} K_{2s}(t, \tau) d\tau}{\int_{-\infty}^{+\infty} K_{2x}(t, \tau) d\tau} \gg 1, \quad (2)$$

где $K_{2s}(t, \tau)$ – текущая корреляционная функция $s(t)$, $K_{2x}(t, \tau)$ – текущая корреляционная функция процесса $X(t)$.

В теории нестационарных процессов известны два направления их анализа: распространение положений теории стационарных случайных процессов на нестационарные случайные процессы и разработка специальных методов анализа нестационарных случайных процессов [12]. Для проведения исследований было выбрано первое направление анализа – стационаризация одного из параметров случайного процесса, а именно математического ожидания.

При анализе нестационарных процессов, представленных одной реализацией, условия нестационарности не позволяют значительно увеличить длительность реализации. Чтобы выйти из этого положения, нужно реализацию нестационарного случайного процесса разделить на участки длительностью T . При этом характер участков и время T выбираются такими, чтобы с заданной степенью точности можно было оценки характеристик процесса на каждом участке считать стационарными. Зная оценки на участках, можно затем построить график изменения характеристик процесса во времени. Наибольший интерес представляет выбор оптимальной длительности участка реализации T_{opt} , при которой суммарная погрешность оценки будет минимальной. Таким образом, для процессов, относящихся к классу процессов с обобщенной текущей эргодичностью, характерны малое изменение функции $s(t)$ от реализации к реализации и медленное изменение во времени. В нашем случае реализация одна, она относится к классу процессов с обобщенной текущей эргодичностью, и значит, в процессе исследования требуется впоследствии оценивать ошибку при различных значениях временных осреднений процесса, поскольку задаться значением $\delta_{\text{пор}}$ при наличии одной реализации весьма проблематично.

Подводя итог, можно определиться с методикой исследования. Применяв к процессу процедуру сглаживания одним из известных методов (линейной регрессии, скользящего среднего, вейвлет-обработкой или иным) получим его оценку математического ожидания. Затем вычитаем ординаты полученной кривой математического ожидания из соответствующих ординат реализации, тем самым получаем процесс, стационаризованный по математическому ожиданию. После этого осуществляем преобразование Фурье полученного стационаризованного процесса. Процедуру преобразования Фурье нужно применить многократно к стационаризуемому процессу, каждый раз изменяя время осреднения при сглаживании. Оценка точности при этом следует проводить, сравнивая полученные спектры и оценивая их по известным климатическим и геологическим событиям. В работе применялись два из упомянутых выше методов сглаживания, а именно метод скользящего среднего и вейвлет-обработка. Для выявления энергетически наиболее выраженных периодов колебаний был применен аппарат спектрального Фурье-анализа математического пакета прикладных программ MatLab.

3. Обсуждение результатов

Для проведения осреднения необходимо выбрать такие периоды, процессы с которыми прослеживаются на протяжении длительного времени и являются наиболее характерными для исследуемого ряда приземной температуры воздуха. Предварительный анализ исследуемого ряда температур показал, что для осреднения исходного ряда температур нужно использовать несколько временных отрезков $T_{\text{оср}}$ разной длительности.

Представленный в работе [6] анализ тысячелетних изменений климата по данным GISP2 показал наличие ярко выраженных периодичностей в диапазоне 830–1050 лет. Вейвлет-анализ GISP2 [13] также показал наличие доминирующих периодичностей 1130–1140, 790–770, 560–590 и 390–360 лет. В работах [14, 15] 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 магнитудой около 15–20% от ледниково-доледникового температурного изменения [16]. Таким образом, для климатических изменений наиболее характерна периодичность ~ 1470 ± 500 лет [3, 6]. Кроме того, в [17] показано, что для климатических изменений также характерны цикличности с периодом 2000–3000 лет.

Ранее примененные методы Фурье-анализа [9] и вейвлет-анализа [18] к преобразованному ряду реконструированных значений приземной температуры воздуха за ~ 50000 лет в центральной части Гренландии, также позволили выделить основные гармоники с периодами в 2500, 1500, 1000 и 450 лет. Таким образом, несмотря на различные ряды, используемые для выявления значимых периодичностей, в результате получены близкие значения. Итак, для проведения исследований были выбраны три значения времени осреднения: 1-е – в пределах 400–500 лет, 2-е – около 2000 лет и 3-е – до 4000 лет. Процесс с периодом в 4000 лет, в принципе, может быть описан событиями Хайнриха [19] – явлениями

нарушения термохалинной циркуляции, вызывавшими похолодание в северном полушарии.

Результаты осреднения представлены на рис. 2, *a–e*, где изображены исходный ряд температур с наложенным на него собственным трендом, вычисленным методами скользящего среднего и вейвлет-преобразованием, с разным временем осреднения. Осреднение методом скользящего среднего традиционно и особых пояснений не требует. Осреднение вейвлет-преобразованием осуществлялось путем вейвлет-разложения процесса до определенного уровня, соответствующему заданному времени осреднения, с последующим вейвлет-восстановлением только аппроксимирующих коэффициентов на один уровень вверх. Эти восстановленные на один уровень аппроксимирующие коэффициенты и представляют собой тренд процесса с заданным временем осреднения. Время осреднения $T_{\text{оср}}$ в зависимости от уровня разложения n вычисляется по формуле

$$T_{\text{оср}} = 30 \cdot 2^{n-1}, \quad (3)$$

где число 30 соответствует шагу по времени исследуемого ряда (годы).

Для проведения исследования выбран достаточно длинный симметричный вейвлет *sym10*. Впрочем, для построения тренда тип вейвлета особой роли не играет, так как временной масштаб анализа определяет глубина разложения, а не длина вейвлета, а применение вейвлета с более коротким носителем придаст некоторую угловатость полученному тренду. Применение же в нашем случае более протяженного вейвлета большего сглаживания процесса не осуществит, но увеличит время решения задачи.

Проведенное осреднение методом скользящего среднего и путем вейвлет-разложения процесса с использованием наименьшего периода осреднения в пределах 400–500 лет показало, что тренды практически повторяют исходный ряд реконструированных температур, а результаты осреднения разными методами отличаются незначительно (рис. 2, *a, б*).

Использование второго периода осреднения в пределах 2000 лет при осреднении методом скользящего среднего и путем вейвлет-разложения процесса показало, что тренды значительно отличаются от исходного ряда реконструированных температур. Период осреднения в 2000 лет позволил избавиться в тренде от значительной части короткопериодических колебаний. Кроме того, результаты осреднения, проведенные разными методами, также значительно отличаются. Метод вейвлет-разложения дал более сглаженный результат (рис. 2, *в, г*). Тренды в обоих случаях хорошо характеризуют исходный ряд температур, выявляя основные закономерности его динамики.

Третий период осреднения в 4000 лет, использованный в методах скользящего среднего и вейвлет-разложения, дал удовлетворительные результаты. Следует отметить, что тренды в этом случае существенно отличаются от исходного ряда реконструированных температур. Период осреднения в 4000 лет позволил избавиться от большей части коротко- и среднепериодических колебаний. Кроме того, результаты осреднения, полученные разными методами, сильно отличаются (рис. 2, *д, е*). Полученные тренды в обоих случаях выявляют только основные тенденции динамики исходного ряда температур.

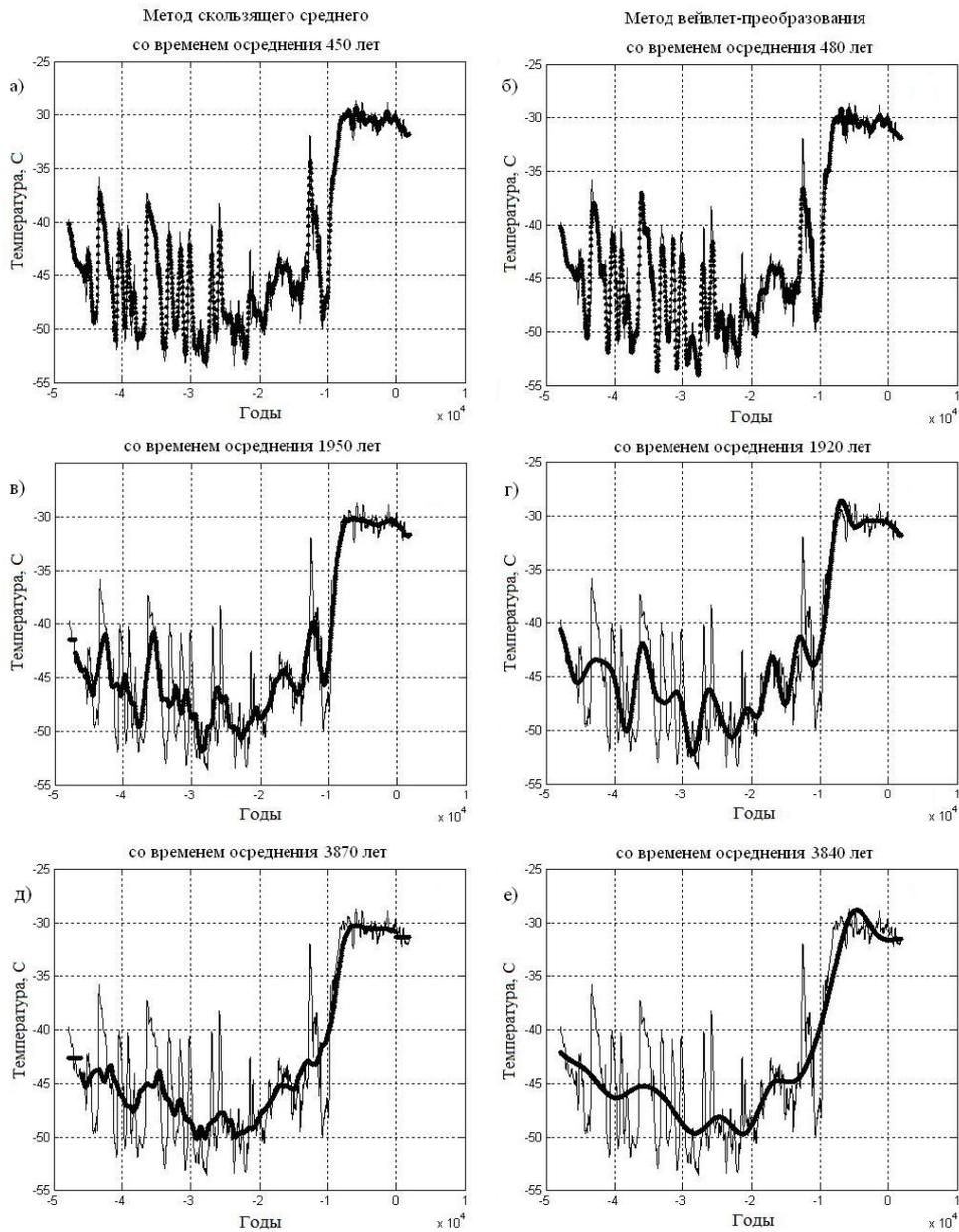


Рис. 2. Исходный ряд реконструированных температур (тонкая линия) с наложенными трендами (жирная линия), полученными методом скользящего среднего (а) со временем осреднения 450 лет, (б) со временем осреднения 1950 лет, (д) со временем осреднения 3870 лет и методом вейвлет-преобразования (б) со временем осреднения 480 лет, (г) со временем осреднения 1920 лет, (е) со временем осреднения 3840 лет

Таким образом, временной отрезок в 4000 лет, использованный для осреднения и интерпретированный как события Хайнриха, дал самые худшие результаты. Причина этого состоит в том, что чем больший период осреднения используется, тем более сглаженный ряд получается, который отражает только самую общую тенденцию хода температур. Кроме того, события Хайнриха,

на протяжении всего периода их наблюдений не имеют постоянной периодичности и могут меняться от 4000 до 10000 лет, что связано с энергетикой процесса, приводящего к реализации события.

Изменение периодичности события Хайнриха в 2–2.5 раза, пусть даже на довольно большом временном отрезке, приведет к тому, что при осреднении с использованием постоянной величины 4000 лет произойдет потеря значительных событий основного ряда температур. Так, проведенное осреднение в 4000 лет привело к потере ярко выраженного всплеска, который описывает резкое изменение температуры воздуха – сначала резкое повышение, а затем резкое понижение в пределах 11–13 тыс. лет тому назад. Именно этот временной отрезок, который характеризуется стремительным падением температуры, называется поздним дриасом и в геохронологии является завершающим этапом последнего оледенения [20–23].

Далее проводилась стационаризация одного из параметров случайного процесса, а именно математического ожидания. Из значений процесса вычитались значения тренда, после чего проводилось Фурье-преобразование стационаризованного ряда температур. В результате проведенного Фурье-преобразования были получены сначала амплитудно-фазовые частотные спектры и на их основе рассчитаны энергетические спектры. Все энергетические спектры нормировались по длительности для того, чтобы получить возможность сравнивать их между собой по уровню энергии. Графическое отображение спектров не стандартное, а трансформированное: по оси ординат всех полученных спектров отложены нормированные значения энергии спектральных компонент (мод), а по оси абсцисс отложена не частота, а время, то есть период (в годах) появления соответствующей спектральной компоненты. При этом максимальная ширина спектра будет определяться половинной частотой самого короткопериодического процесса, которым является шаг ряда, равный 30 годам. Таким образом, максимальная ширина спектра будет иметь значение, равное $1/60 \text{ лет}^{-1}$, а разрешающая способность спектра – значение, зависящее от величины выборки, то есть от длины ряда. Результаты расчетов представлены графически на рис. 3–5 для разных периодов и методов осреднения. Рассмотрим результаты стационаризации ряда реконструированных температур методом скользящего среднего со временем осреднения 450 лет (рис. 3, а). Анализ стационаризованного ряда показал, что в ледниковом и переходном периодах наблюдаются большие колебания температуры по амплитуде ($> 4.0 \text{ }^\circ\text{C}$), но малые по продолжительности. Это свидетельствует о довольно резких колебаниях энергии, которая затрачивается на реализацию процесса изменения температуры. В голоцен амплитуда этих колебаний достигает ($\sim 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$), то есть этот период времени характеризуется устойчивостью, почти неизменными значениями энергии. Результаты стационаризации ряда реконструированных температур методом вейвлет-преобразования со временем осреднения 480 лет показали, что в ледниковом и переходном периодах колебания температуры по амплитуде достигают значения $\sim 6.0 \text{ }^\circ\text{C}$ и также являются малыми по продолжительности (рис. 3, в).

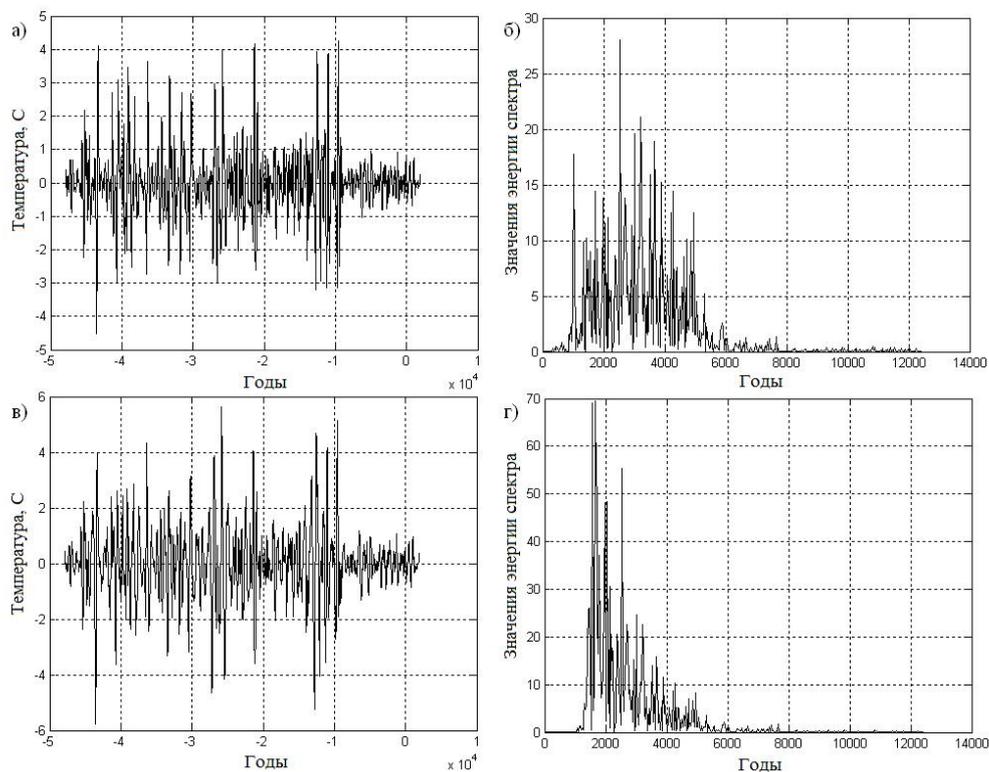


Рис. 3. Стационаризованный исходный ряд реконструированных температур, полученный методом скользящего среднего (*а*) со временем осреднения 450 лет, и его спектр (*б*); методом вейвлет-преобразования (*в*) со временем осреднения 480 лет и его спектр (*г*)

Графическое представление спектров, полученных в результате Фурье-преобразования стационаризованного ряда температур, показало значительные отличия, обусловленные разными методами осреднения. Спектр, рассчитанный на основе стационаризованного методом скользящего среднего ряда, дал довольно большой временной разброс гармоник от 1000 до 6000 лет, максимальная из которых соответствует периоду ~ 2500 лет (рис. 3, *б*). Анализ спектра, полученного на основе стационаризованного методом вейвлет-преобразования ряда дал гораздо меньший разброс гармоник от 1500 до 4000 лет, из которых надо выделить основные: с периодом ~ 1500 и ~ 2500 лет (рис. 3, *г*). Так как все энергетические спектры нормировались по длительности для того, чтобы мы могли сравнивать их между собой по уровню энергии, сравнительный анализ показал, что гармоника 2500 лет, полученная на основе стационаризованного методом скользящего среднего ряда, имеет энергию, в 2 раза меньшую, чем на основе ряда, стационаризованного методом вейвлет-преобразования.

Рассмотрим результаты стационаризации ряда реконструированных температур двумя методами со временем осреднения ~ 2000 лет (рис. 4). Анализ стационаризованного методом скользящего среднего ряда показал, что в ледниковом и переходном периодах наблюдаются большие колебания температуры по амплитуде (~ 9.0 °C), в голоцен амплитуда этих колебаний достигает ~ 2.0 °C

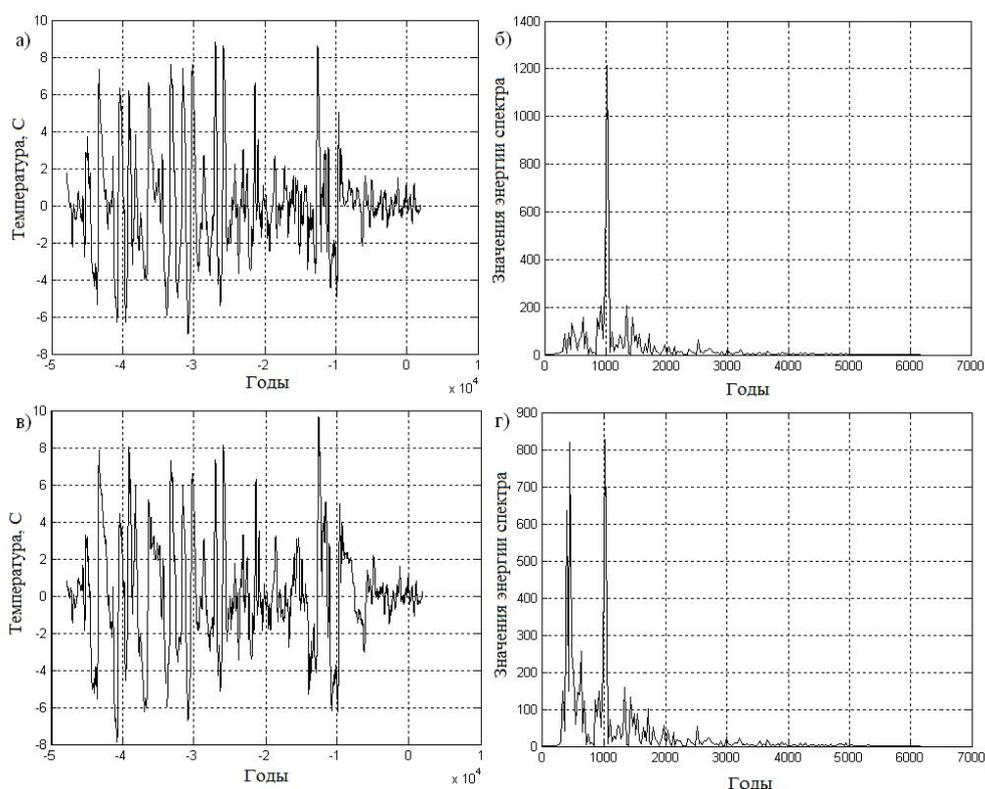


Рис. 4. Стационаризованный исходный ряд реконструированных температур, полученный методом скользящего среднего (*а*) со временем осреднения 1950 лет, и его спектр (*б*); методом вейвлет-преобразования (*в*) со временем осреднения 1920 лет и его спектр (*г*)

(рис. 4, *а*). В результате стационаризации методом вейвлет-преобразования эти колебания по амплитуде достигают соответственно ~ 10.0 °C и ~ 3.0 °C (рис. 4, *в*). Спектр стационаризованного методом скользящего среднего ряда дал одну главную гармонику с периодом 1000 лет (рис. 4, *б*), а спектр стационаризованного методом вейвлет-преобразования ряда – две гармоники с периодом ~ 400 лет и ~ 1000 лет (рис. 4, *г*). Энергия 1000-летней гармоники, полученной разными методами, отличается незначительно.

Перейдем к анализу результатов стационаризации ряда реконструированных температур двумя методами со временем осреднения ~ 4000 лет (рис. 5). Оказалось, что колебания по амплитуде в ледниковом и переходном периодах (~ 12.0 °C) и в голоцене (~ 2.0 °C), полученные разными методами, совпадают (см. рис. 5, *а*, *в*). Кроме того, стационаризованный ряд (по двум методам) со временем осреднения ~ 4000 лет довольно хорошо описывает исходный ряд реконструированных температур.

Очень похожи также спектры стационаризованных рядов, полученных двумя методами (рис. 5, *б*, *г*). В обоих случаях выявлены две основные гармоники с периодами ~ 300 лет и ~ 1000 лет. Кроме того, можно выделить два всплеска со значениями 1300 и 1400 лет. Таким образом, значения энергии основных гармоник, полученных разными методами, отличаются незначительно.

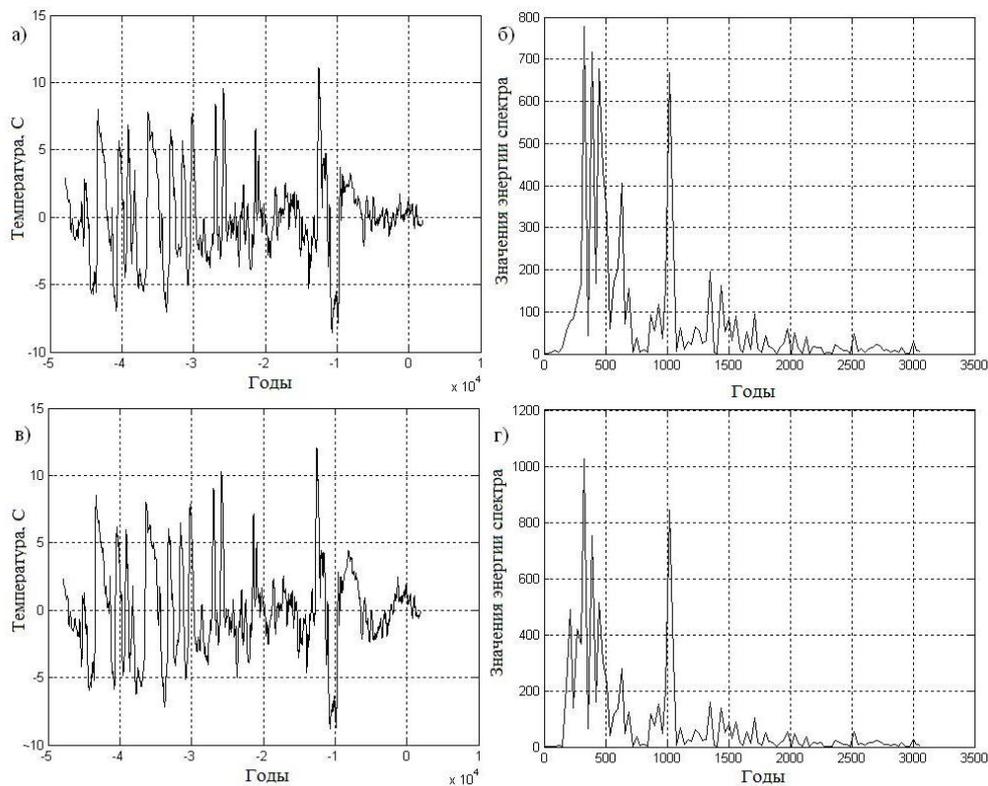


Рис. 5. Стационаризованный исходный ряд реконструированных температур, полученный методом скользящего среднего (а) со временем осреднения 3870 лет, и его спектр (б); методом вейвлет-преобразования (в) со временем осреднения 3840 лет и его спектр (г)

Итак, оценим полученные результаты и сравним их с результатами проведенного Фурье-анализа аномалий ряда реконструированных температур, разделенного на три части [9]. В упомянутой работе было проведено выделение временных периодов, которым присущи свои колебания и средние значения: ледниковый период длительностью 35280 лет (49830–14550 лет назад), длина ряда составляет 1176 значений; переходный период длительностью 4 530 лет (14550–10020 лет назад), длина ряда составляет 151 значение; послеледниковый период (наше время) длительностью 10020 лет (10020 лет назад – по наше время), длина ряда составляет 334 значения. Для уменьшения в спектре доли постоянной составляющей для каждого из трех временных периодов было определено среднее значение температуры и относительно среднего рассчитаны отклонения температур, то есть аномалии. При проведении исследований осуществлялся Фурье-анализ аномалий. При этом предполагалось, что во всех трех анализируемых периодах процесс является стационарным. Представим теперь все полученные разными методами спектральные моды в виде таблицы. Проанализируем только основные моды, а именно наиболее часто фиксирующиеся при делении ряда на периоды, а также имеющие максимальные значения энергии для стационаризованного разными методами ряда (табл. 1).

Табл. 1

Периодичности процессов, полученные в результате Фурье-анализа

Нестационаризованный ряд с разделением на периоды [9]			Стационаризованный ряд					
49830– 14550 лет назад	14550– 10020 лет назад	10020 лет назад – по наше время	Метод скользящего среднего			Метод вейвлет- преобразования		
			Время осреднения			Время осреднения		
			450	1950	3870	480	1920	3840
Периодичность появления спектральных мод (годы)								
2325	2272		2500			2500		
1408		1666				1500		
1000		1000		1000	1000		1000	1000
400	411	385			~ 300		400	~ 300

К осцилляциям Дансгора – Эшгера, представляющим высокочастотную или короткопериодическую цикличность (1000, 1450 и 3000 лет), можно отнести полученные моды 2500, 1500 и 1000 лет. Здесь также можно говорить о многовековых циклах Бонда с периодом 1470 ± 500 лет. Таким образом, нам известно, что климат и общая увлажненность материков Северного полушария изменялись циклически, в интервале 1500–2500 лет. Как видим, полученные нами результаты хорошо согласуются с известной цикличностью процессов в климатической системе планеты, а выявленные моды вполне сопоставимы и хорошо соответствуют друг другу.

Заключение

Проведенный анализ стационаризованного разными методами ряда реконструированной по данным ледовых кернов температуры в центральной части Гренландии позволяет сделать следующие выводы:

1) проведенное осреднение методом скользящего среднего и путем вейвлет-разложения процесса с использованием наименьшего периода осреднения в пределах 400–500 лет показало, что тренды практически повторяют исходный ряд реконструированных температур, а результаты осреднения разными методами отличаются незначительно;

2) использование второго периода осреднения в пределах 2000 лет при осреднении методом скользящего среднего и путем вейвлет-разложения процесса показало, что тренды в обоих случаях хорошо характеризуют исходный ряд температур, выявляя основные закономерности его динамики;

3) использование периода со временем осреднения ~ 4000 лет, обусловленного событиями Хайнриха, показало худший результат. Это обусловлено тем, что события Хайнриха не имеют постоянной периодичности и могут меняться от 4000 до 10000 лет. Изменение периодичности события Хайнриха в 2–2.5 раза, пусть даже на довольно большом временном отрезке, привели к тому, что при осреднении с использованием постоянной величины 4000 лет произошла потеря значительного события основного ряда температур;

4) стационаризация ряда реконструированных температур методом скользящего среднего и методом вейвлет-преобразования показала лучшие результаты со временем осреднения ~ 400 и ~ 2000 лет, причем метод вейвлет-преобразования дал результаты, хорошо соответствующие результатам ранее проведенных исследований;

5) сравнительный анализ полученных результатов с результатами проведенного ранее Фурье-анализа аномалий разделенного на три части ряда реконструированных температур показал, что оба подхода дополняют друг друга, так как полученные моды вполне сопоставимы.

Таким образом, были выявлены основные, характерные для ряда реконструированной температуры гармоник, согласующиеся с цикличностью процессов в климатической системе планеты. В дальнейшем представляет интерес исследование динамики выявленных гармоник на протяжении всего времени наблюдения.

Литература

1. *Казакевич Д.И.* Основы теории случайных функций и её применение в гидрометеорологии. – Л.: Гидрометеоздат, 1977. – 320 с.
2. *Залманзон Л. А.* Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. – М.: Наука, 1989. – 496 с.
3. *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*. – 1993. – V. 366. – P. 552–554.
4. *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-age scale of the GISP2 ice core. Special CRREL Report 94-1. – Hanover, NH: US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1994. – 66 p.
5. *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 // *Quat. Res.* – 1997. – V. 48, No 3. – P. 259–266.
6. *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 // *Quat. Res.* – 1995. – V. 44, No 3. – P. 341–354.
7. *Монин А.С.* Введение в теорию климата. – Л.: Гидрометеоздат, 1982. – 246 с.
8. *Кляшторин Л.Б., Любушин А.А.* Циклические изменения климата и рыбопродуктивности. – М.: ВНИРО, 2005. – 235 с.
9. *Данова Т.Е., Перелыгин Б.В.* Результаты Фурье-анализа данных палеорекострукции температуры в центральной части Гренландии // *Учен. зап. Рос. гос. гидрометеорол. ун-та*. – 2013. – № 32. – С. 83–93.
10. *Лоева И.Д., Евсеева Л.П.* Статистический анализ временных рядов. // *Труды ГГО*, 1983. – Вып. 475. – С. 101–108.
11. *Грибанов Ю.И., Мальков В.Л.* Спектральный анализ случайных процессов. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
12. *Котюк А.Ф., Цветков Э.И.* Спектральный и корреляционный анализ нестационарных случайных процессов. – М.: Изд-во стандартов, 1970. – 103 с.

13. *Humlum O., Solheim J-E., Stordahl K.* Identifying natural contributions to late Holocene climate change // *Global and Planetary Change*. – 2011. – V. 79, No 1–2. – P. 145–156. – doi: 10.1016/j.gloplacha.2011.09.005.
14. *Bond G., Showers W., Cheseby M., Lotti R., Almasi P., deMenocal P., Priore P., Cullen H., Hajdas I., Bonani G.* A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates // *Science*. – 1997. – V. 278. – P. 1257–1266. – doi: 10.1126/science.278.5341.1257.
15. *Bond G., Kromer B., Beer J., Muscheler R., Evans M.N., Showers W., Hoffmann S., Lotti-Bond R., Hajdas I., Bonani G.* Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene // *Science*. – 2001. – V. 294. – P. 2130–2136. – doi: 10.1126/science.1065680.
16. *Dansgaard W., Johnsen S.J., Clausen H.B., Dahl-Jensen D., Gundestrup N., Hammer C.U., Oeschge H.* North Atlantic climatic oscillations revealed by deep Greenland ice cores // *Climatic Processes and Climate Sensitivity, Geophysical Monograph 29*. – Washington, DC: Am. Geophys. Union, 1984. – P. 288–298.
17. *Bond G.C., Rusty L.* Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the last glaciation // *Science*. – 1995. – P. 1005–1010. – doi: 10.1126/science.267.5200.1005.
18. *Данова Т.Е., Перельгин Б.В.* Применение вейвлет-анализа для уточнения возраста событий Хайнриха // *Геофиз. журн.* – 2015. – Т. 37, № 1. – С. 165–175.
19. *Primeau F.* Characterizing transport between the surface mixed layer and the ocean interior with a forward and adjoint global ocean transport model // *J. Phys. Oceanogr.* – 2005. – V. 35. – P. 545–564.
20. *Rapp D.* *Ice Ages and Interglacials: Measurements, Interpretation and Models*. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – 285 p.
21. *Taylor K.C.* The Holocene-Younger Dryas transition recorded at Summit, Greenland // *Science*. – 1997. – V. 278. – P. 825–827. – doi: 10.1126/science.278.5339.825.
22. *Hughen K.A.* Synchronous radiocarbon and climate shifts during the last deglaciation // *Science*. – 2000. – V. 290. – P. 1951–1954. – doi: 10.1126/science.290.5498.1951.
23. *Spurk M.* Revisions and extension of the Hohenheim oak and pine chronologies: New evidence about the timing of the Younger Dryas/Preboreal transition // *Radiocarbon*. – 1998. – V. 40, No 3. – P. 1107–1116.

Поступила в редакцию
21.04.16

Данова Татьяна Евгеньевна, кандидат географических наук, научный сотрудник отдела взаимодействия атмосферы и океана

Морской гидрофизический институт РАН
ул. Капитанская, д. 2, г. Севастополь, 299911, Россия
E-mail: danova8@mail.ru

Перельгин Борис Викторович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматизированных систем мониторинга окружающей среды

Одесский государственный экологический университет
ул. Львовская, д. 15, г. Одесса, 65016, Украина
E-mail: satel@ogmi.farlep.odessa.ua

Harmonic Analysis of a Nonstationary Series of Temperature Paleoreconstruction for the Central Part of Greenland*T.E. Danova^{a*}, B.V. Perelygin^{b**}*^a*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, 299011 Russia*^b*Odessa State Environmental University, Odessa, 65016 Ukraine*E-mail: **danova8@mail.ru*, ***satel@ogmi.farlep.odessa.ua*

Received April 21, 2016

Abstract

The results of the investigations of a transformed series of reconstructed air temperature data for the central part of Greenland with an increment of 30 years have been presented. Stationarization of a ~50,000-years' series of the reconstructed air temperature in the central part of Greenland according to ice core data has been performed using mathematical expectation. To obtain mathematical expectation estimation, the smoothing procedure by the methods of moving average and wavelet analysis has been carried out. Fourier's transformation has been applied repeatedly to the stationarized series with changing the averaging time in the process of smoothing. Three averaging time values have been selected for the investigations: ~400–500 years, ~2,000 years, and ~4,000 years. Stationarization of the reconstructed temperature series with the help of wavelet transformation showed the best results when applying the averaging time of ~400 and ~2000 years, the trends well characterize the initial temperature series, thereby revealing the main patterns of its dynamics. Using the period with the averaging time of ~4,000 years showed the worst result: significant events of the main temperature series were lost in the process of averaging. The obtained results well correspond to cycling known to be inherent to the climatic system of the planet; the detected modes of $1,470 \pm 500$ years are comparable to the Dansgaard–Oeschger and Bond oscillations.

Keywords: ice cores, nonstationary series, trend, stationarization, harmonic analysis**Figure captions**

- Fig. 1. Transformed series of reconstructed air temperature data for the central part of Greenland with an increment of 30 years.
- Fig. 2. Initial series of reconstructed temperatures (thin line) with the imposed trends (heavy line) obtained by the method of moving average (*a*) with the averaging time of 450 years, (*c*) 1950 years, (*e*) 3870 years, as well as by the method of wavelet transformation (*b*) with the averaging time of 480 years, (*d*) 1920 years, and (*e*) 3840 years.
- Fig. 3. Stationarized initial series of reconstructed temperatures obtained by the method of moving average (*a*) with the averaging time of 450 years and its spectrum (*b*); the same series obtained by the method of wavelet transformation (*c*) with the averaging time of 480 years and its spectrum (*d*).
- Fig. 4. Stationarized initial series of reconstructed temperatures obtained by the method of moving average (*a*) with the averaging time of 1950 years and its spectrum (*b*); the same series obtained by the method of wavelet transformation (*c*) with the averaging time of 1920 years and its spectrum (*d*).
- Fig. 5. Stationarized initial series of reconstructed temperatures obtained by the method of moving average (*a*) with the averaging time of 3870 years and its spectrum (*b*); the same series obtained by the method of wavelet transformation (*c*) with the averaging time of 3840 years and its spectrum (*d*).

References

1. Kazakevich D.I. Principles of the Theory of Random Functions and Its Application in Hydrometeorology. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1977. 320 p. (In Russian)
2. Zalmanzon L.A. Fourier, Walsh, and Haar Transforms and Their Applications in Control, Communication, and Other Fields. Moscow, Nauka, 1989. 496 p. (In Russian)
3. 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*, 1993, vol. 366, pp. 552–554.
4. 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-Age Scale of the GISP2 Ice Core. Special CRREL Report 94-1. Hanover, NH, US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1994. 66 p.
5. 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. *Quat. Res.*, 1997, vol. 48, no. 3, pp. 259–266.
6. Stuiver M., Grootes P.M., Braziunas T.F. The GISP2 ^{18}O climate record of the past 16,500 years and the role of the sun, ocean and volcanoes. *Quat. Res.*, 1995, vol. 44, no. 3, pp. 341–354.
7. Monin A.S. Introduction to the Climate Theory. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1982. 246 p. (In Russian)
8. Klyashtorin L.B., Lyubushin A.A. Cyclic Climate Changes and Fish Productivity. Moscow, VNIRO, 2005. 235 p. (In Russian)
9. Danova T.E., Perelygin B.V. Results of the Fourier analysis of data of temperature paleoreconstruction of in the central part of Greenland. *Uch. Zap. Ros. Gos. Gidrometeorol. Univ.*, 2013. no. 32, pp. 83–93. (In Russian)
10. Loeva I.D., Evseeva L.P. Statistical analysis of time series. *Tr. GGO*, 1983, vol. 475, pp. 101–108. (In Russian)
11. Gribanov Yu.I., Mal'kov V.L. Spectral Analysis of Random Processes. M.: Energiya, 1974. 240 p. (In Russian)
12. Kotyuk A.F., Tsvetkov E.I. Spectral and Correlation Analysis of Nonstationary Random Processes. Moscow, Izd. Stand., 1970, 103 p. (In Russian)
13. Humlum O., Solheim J.-E., Stordahl K. Identifying natural contributions to late Holocene climate change. *Global Planet. Change*, 2011, vol. 79, nos. 1–2, pp. 145–156. doi: 10.1016/j.gloplacha.2011.09.005.
14. Bond G., Showers W., Cheseby M., Lotti R., Almasi P., deMenocal P., Priore P., Cullen H., Hajdas I., Bonani G. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 1997, vol. 278, pp. 1257–1266. doi: 10.1126/science.278.5341.1257.
15. Bond G., Kromer B., Beer J., Muscheler R., Evans M.N., Showers W., Hoffmann S., Lotti-Bond R., Hajdas I., Bonani G. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 2001, vol. 294, pp. 2130–2136. doi: 10.1126/science.1065680.
16. Dansgaard W., Johnsen S.J., Clausen H.B., Dahl-Jensen D., Gundestrup N., Hammer C.U., Oeschge H. North Atlantic climatic oscillations revealed by deep Greenland ice cores. *Climatic Processes and Climate Sensitivity, Geophysical Monograph 29*. Washington, DC, Am. Geophys. Union, 1984. pp. 288–298.
17. Bond G.C., Rusty L. Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the last glaciation. *Science*, 1995, pp. 1005–1010. doi: 10.1126/science.267.5200.1005.
18. Danova T.E., Perelygin B.V. Application of wavelet analysis for updating Heinrich events age. *Geofiz. Zh.*, 2015. vol. 37, no. 1, pp. 165–175. (In Russian)
19. Primeau F. Characterizing transport between the surface mixed layer and the ocean interior with a forward and adjoint global ocean transport model. *J. Phys. Oceanogr.*, 2005, vol. 35, pp. 545–564.
20. Rapp D. Ice Ages and Interglacials: Measurements, Interpretation and Models. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2009. 285 p.
21. Taylor K.C. The Holocene-Younger Dryas transition recorded at Summit, Greenland. *Science*, 1997, vol. 278, pp. 825–827. doi: 10.1126/science.278.5339.825.
22. Hughen K.A. Synchronous radiocarbon and climate shifts during the last deglaciation. *Science*, 2000, vol. 290, pp. 1951–1954. doi: 10.1126/science.290.5498.1951.

23. Spurk M. Revisions and extension of the Hohenheim oak and pine chronologies: new evidence about the timing of the Younger Dryas/Preboreal transition. *Radiocarbon*, 1998, vol. 40, no. 3, pp. 1107–1116.
-

⟨ **Для цитирования:** Данова Т.Е., Перелыгин Б.В. Гармонический анализ нестационарного ряда температурной палеорекострукции для центральной части Гренландии // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2016. – Т. 158, кн. 2. – С. 293–310. ⟩

⟨ **For citation:** Danova T.E., Perelygin B.V. Harmonic analysis of a nonstationary series of temperature paleoreconstruction for the central part of Greenland. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2016, vol. 158, no. 2, pp. 293–310. (In Russian) ⟩