

## Применение вейвлет-анализа для уточнения возраста событий Хайнриха

© Т. Е. Данова, Б. В. Перельгин, 2015

Одесский государственный экологический университет,  
Одесса, Украина

Поступила 9 ноября 2013 г.

Представлено членом редколлегии В. Г. Бахмутовым

Досліджено енергетику спектральних складових, отриманих за допомогою вейвлет-аналізу перетвореного ряду реконструйованої температури в центральній частині Гренландії за даними льодових кернів. Виявлено осциляції з фіксованим періодом і нестационарні осциляції. Уточнено вік епізодів Хайнриха. Вейвлет-аналіз дав змогу співвіднести події з конкретними кліматичними явищами та оцінити енергетику цих явищ.

**Ключові слова:** льодові керни, реконструйована температура повітря, вейвлет-аналіз, епізоди Хайнриха.

**Введение.** Цикличность и ритмичность изменения палеоклиматов отмечали многие исследователи. Но такая цикличность не была доказана до появления данных об изменении изотопного состава многолетних ледниковых кернов. С середины XX в. все большую роль в изучении климатических систем прошлого играет анализ кернов из глубоких скважин, пробуренных на ледниках в зонах аккумуляции. Анализ содержания в ледяном керне дейтерия, микрочастиц, парниковых газов и изотопов уже позволил оценить изменения температуры воздуха за период около 800 тыс. лет [EPICA ..., 2004; Jouzel et al., 2007]. Детальные палеорекострукции температуры строятся на основе анализа изотопного состава кернов, а именно, процентного содержания тяжелого изотопа кислорода  $^{18}\text{O}$  (его среднее содержание в природе — около 0,2% от всех атомов кислорода). Молекулы воды, содержащие этот изотоп, тяжелее испаряются и легче конденсируются. Поэтому, например, в водяном паре над поверхностью моря содержание  $^{18}\text{O}$  ниже, чем в морской воде. А в конденсации на поверхности формирующихся в облаках снежных кристаллов охотнее принимают участие молекулы воды, содержащие  $^{18}\text{O}$ , благодаря чему их содержание в осадках выше, чем в водяном паре, из которо-

го осадки формируются. Чем ниже температура формирования осадков, тем сильнее проявляется данный эффект, т. е. больше в них  $^{18}\text{O}$ . 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 [Grootes et al., 1993; Meese et al., 1994; Stuiver et al., 1995, 1997]. Все это дает основания рассматривать гренландские ледниковые керны в качестве чувствительного естественного регистратора температурных флуктуаций в Северном полушарии и, в частности, в Европе.

Цикличности средней периодичности (5000 ... 10 000 лет) названы событиями Хайнриха и выделены как цикличности резких изменений изотопного состава льда в ледниковых кернах Гренландии, проявляющихся в виде гигантских сердечей. Литологические осадки, соответствующие событиям Хайнриха, выделяются как слои, насыщенные детритом. Последний перенесен айсбергами в результате периодической нестациональности ледовых потоков с североамерикан-

ского Лаврентийского ледникового щита в течение последних 70—60 тыс. лет [Васильчук, 2009]. Таким образом, периоды накопления этих слоев и являются событиями Хайнриха, получившими порядковые номера, возрастающие по мере увеличения возраста. Датировка событий Хайнриха не является простой и законченной процедурой. В работах [Hemming, 2004; Vidal et al., 1999; Bond, Lotti, 1995; Васильчук, 2009] предприняты различные подходы к датировке событий Хайнриха.

**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 [Grootes et al., 1993; Meese et al., 1994; Stuiver et al., 1995, 1997]. 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 [Grootes et al., 1993; Meese et al., 1994; Stuiver et al., 1995, 1997]. Восстановленная температура воздуха в приземном слое в центральной части Гренландии за последние 50 тыс. лет была получена на основе анализа стабильных изотопов  $N_2$  и  $Ar$ , полученных из ледовых кернов. Она отражает ход зимних значений температуры воздуха, которые близки к среднегодовым температурам [Монин, 1982]. Реконструированные значения температуры за последние 50 тыс. лет предоставлены World Data Center for Paleoclimatology, Boulder, USA ([www.ncdc.noaa.gov/paleo/datalist.html](http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/datalist.html)). Эти данные представляют собой набор точек, фиксирующих изме-

нение температуры воздуха в нерегулярные моменты времени.

Для исследования был использован преобразованный ряд реконструированных значений температуры примерно за 50 тыс. лет (точнее — за 49 830 лет). Для этого из исходного ряда была сформирована выборка значений температуры через каждые 30 лет [Монин, 1982] (рис. 1).

Таким образом, длина ряда составляет 1661 значение. А период выборки величиной в 30 лет связан с тем, что смена тенденций в изменении давления и температуры и смена типа атмосферной циркуляции влекут за собой соответствующие изменения в угловой скорости вращения Земли. При пониженной частоте появления меридиональной формы циркуляции наблюдается ускорение вращения Земли, и наоборот [Рудяев, 1998]. Эта тенденция имеет квазипериодический характер с примерным периодом в 30—35 лет. Заметим, что кратные гармоники с периодами  $\approx 30 \div 60$  лет характерны для стерических колебаний уровня Мирового океана, глобальной температуры воздуха и температуры поверхности океана [Глок, Малинин, 2011; Кляшторин, Любушкин, 2005].

Температура воздуха за 49 830 лет претерпевала значительные изменения (см. рис. 1). 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 [Кляшторин, Любушкин, 2005]. Каждая цикличность имеет свою меру устойчивости во времени и этим циклам соответствует определенная энергетика, которая зависит от многих внешних и

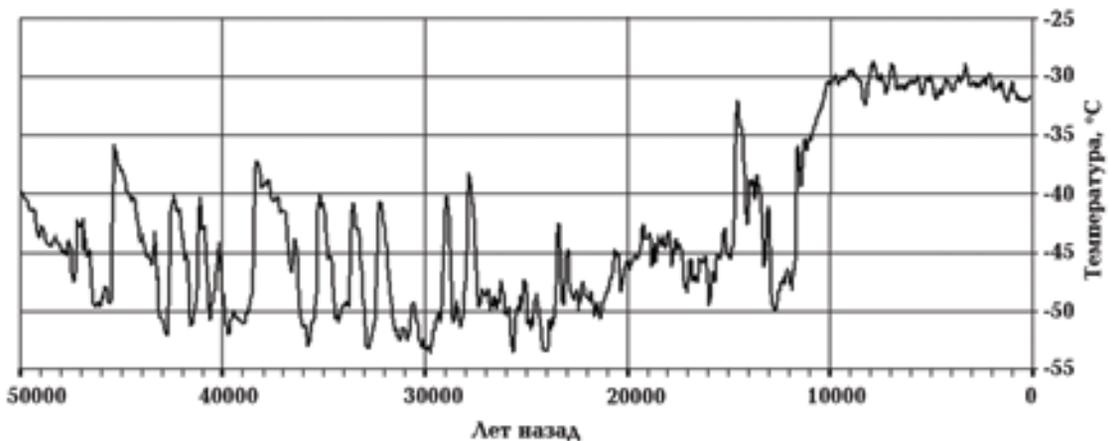


Рис. 1. Преобразованный ряд реконструированных значений температуры в центральной части Гренландии с дискретностью 30 лет.

внутренних климатообразующих факторов. Поэтому важной задачей является выявление не только энергетически значимых периодов колебаний, но и проявления наиболее "ярких" периодичностей в климатической системе планеты.

**Методы исследования.** В работе сделана попытка уточнения возраста событий Хайнриха на основе вейвлет-анализа. Для исследования воспользуемся одномерным непрерывным вейвлет-преобразованием. По аналогии с фурье-преобразованием вейвлет-преобразование — это такое же разложение сигнала в ряд базисных функций, помноженных на определенные коэффициенты. Базисной функцией ряда в этом случае является не гармоника, а так называемый вейвлет. В общем случае формула прямого непрерывного вейвлет-преобразования выглядит следующим образом [Смоленцев, 2005]:

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(x) a^{-1/2} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx, \quad (1)$$

где  $W(a, b)$  — совокупность вейвлет-коэффициентов, несущая всю информацию о сигнале  $s$ .

При построении ряда базисных функций "материнская" вейвлет-функция представляется своими различными сжатыми или растянутыми версиями, смещенными в определенные места на временной (координатной) оси сигнала. Аналитически функция записывается как

$$\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_0\left(\frac{x-b}{a}\right), \quad (2)$$

где  $a$  — параметр, задающий степень сжатия или растяжения (масштаб) вейвлет-функции,  $b$  — параметр, задающий смещение функции по координатной (временной) оси,  $\psi_0$  — сама "материнская" вейвлет-функция, удовлетворяющая определенным условиям.

Для осуществления вейвлет-преобразования базисные вейвлет-функции должны удовлетворять следующим условиям:

- допустимости (нулевого среднего  $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x) dx = 0$ );
- ограниченности (вейвлет должен обладать конечной энергией, т. е.  $\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(x)|^2 dx < \infty$ );
- локализации (вейвлет должен быть локали-

зован вблизи нуля аргумента как во временном, так и в частотном пространстве);

— автомодельности базиса [Астафьева, 1996].

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. В дискретном случае параметры  $a$  и  $b$  изменяются на дискретные значения  $a = 2^j$  и  $b = k2^j$ , где  $j$  и  $k$  — целые числа. В этом случае непрерывный вейвлет-анализ превращается в кратномасштабный вейвлет-анализ, и тогда вейвлет-функция будет иметь вид

$$\psi_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{a_0^j}} \psi\left(x - k / a_0^j\right), \quad (3)$$

а прямое вейвлет-преобразование запишется так:

$$W(j, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(x) a^{-j/2} \psi\left(x - b / a_0^j\right) dx. \quad (4)$$

Идея кратномасштабного анализа заключается в том, что разложение сигнала производится по ортогональному базису, образованному сдвигами и кратномасштабными копиями вейвлет-функции. При этом вводится так называемая масштабирующая или скейлинг-функция  $\phi(x)$  с условием нормирования  $\int_{-\infty}^{+\infty} \phi(x) dx = 1$ .

Это — базис разложения, формируемый на основе вейвлет-функции. В кратномасштабном вейвлет-анализе сигнал рассматривается посредством последовательных приближений его формы с различной степенью детализации. Приближение (аппроксимация) сигнала задается итерационной формулой:

$$s_j(x) = \sum_j W(j, k) \phi_{j,k}(x). \quad (5)$$

Задается как бы масштаб разложения (декомпозиции) и представления сигнала. Причем масштаб или глубина разложения задается непосредственно параметром  $a$  вейвлет-коэффициентов (номером  $j$ ) — это декомпозиция сигнала уровня  $j$ . Нулевой уровень — это исходный сигнал. Если используется ортогональный вейвлет, то для анализа общей формы сигнала

применяется базис  $\varphi(x)$ , а для анализа локальных особенностей сигнала — соответственно базис  $\psi(x)$ .

В вейвлет-анализе, как и в фурье-анализе, тоже существует понятие спектра сигнала. Вейвлет-спектр представляет собой трехмерное изображение коэффициентов  $W(a, b)$ . По оси абсцисс откладывается координата (время)  $b$  сигнала, по оси ординат — значения масштаба  $a$ , а вдоль третьей координаты — значения коэффициентов, номера  $j$  которых соответствуют дискретным значениям масштаба на оси ординат. Номера коэффициентов вдоль оси ординат следуют от нулевого (сам сигнал) до наибольшего значения (грубая копия сигнала). Такой вейвлет-спектр представляет собой некоторую рельефную поверхность и несет в себе информацию о деталях сигнала, не заметных на обычном спектре Фурье, например о разрывах, изменениях знака первой и второй производной и т. д. Правильное дешифрирование вейвлет-спектра может дать полную информацию о сигнале. Способы визуализации этой информации могут быть различными. Вместо изображения поверхностей часто представляют их проекции на плоскость  $ab$  с изолиниями, позволяющими проследить изменение интенсивности амплитуд вейвлет-преобразования на разных масштабах времени [Астафьева, 1996].

При проведении вейвлет-анализа важен выбор самого вейвлет-базиса, т. е. вейвлета. Его необходимо подбирать по выбранному критерию оптимальности. Выбор глубины разложения должен обеспечивать предоставление всех особенностей сигнала при экономии вычислительных ресурсов. Применение методов вейвлет-анализа позволяет выделить наиболее значимые периодичности в соответствии с величиной энергии, которая приходится на каждое колебание. Фурье-анализ не предоставляет информации о вкладе в спектр разных временных периодов анализируемого ряда, т. е. он не обладает свойством временной локализации. Предлагаемое для использования вейвлет-преобразование одномерного ряда позволяет получить двумерный массив значений коэффициентов  $W(a, b)$ . Распределение этих значений в пространстве  $(a, b)$  — по временному масштабу и во времени — дает информацию об эволюции энергетического вклада в вейвлет-спектр процессов разного временного масштаба. Вейвлет-спектр позволяет не только выявить периодичности в случайном процессе, но и проследить динамику изменений периодов колебаний во времени [Астафьева, 1996].

В статье были применены методы вейвлет-анализа к преобразованному ряду реконструированных значений температуры в центральной части Гренландии. Анализ проводился с помощью пакета прикладных программ Wavelet системы компьютерной математики MatLab. Для визуализации была выбрана проективная форма отображения результатов расчетов вейвлет-спектров, потому что на ней лучше наблюдаются особенности процесса, а на трехмерном спектре их рассмотреть сложнее (сравнить рис. 2, а и б). Для анализа выбираем вейвлет, имеющий достаточно узкую и симметричную амплитудно-частотную характеристику и, значит, хорошую разрешающую способность по частоте и в то же время компактный носитель, что обеспечит хорошее временное разрешение. Этим требованиям удовлетворяет входящий в комплект пакета симметричный вейвлет  $\text{sym}6$  (рис. 2, в, г). Глубину разложения численно выбираем равной размерности анализируемого массива данных для того, чтобы не пропустить особенности долгопериодических процессов внутри треугольника достоверности. При более детальном анализе короткопериодических процессов будем уменьшать глубину разложения для улучшения наблюдаемости особенностей.

**Результаты анализа.** Анализ всего ряда длительностью 49 830 лет с дискретностью 30 лет показал наличие многоуровневой структуры, характеризующей временную динамику восстановленной по данным ледовых кернов температуры воздуха Гренландии (рис. 3).

Верхний уровень представлен одним крупномасштабным событием 28 000 лет, которое длилось около 29 250 лет, и характеризует ледниковый период. Практически вся временная динамика анализируемого процесса сосредоточена в масштабе до 15 900 лет, которая, в свою очередь, также делится на несколько уровней (см. рис. 3, а). В среднем уровне можно выделить крупномасштабные периодичности: первое событие (14 100) длительностью 15 450 лет датируется периодом 36 030—20 580 лет, второе (13 100) длительностью 2550 лет датируется периодом 20 580—18 030 лет. Эти события начинаются в середине последнего ледникового периода и характеризуют пиковое Вислинское оледенение. Событие масштабом 15 900 лет датируется периодом 11 430 — наше время и начинается Аллередским потеплением, включает в себя поздний дриас и современный голоцен. Для подробного анализа более короткопериодических процессов разложим тот же ряд на меньшую глубину (см. рис. 3, б).

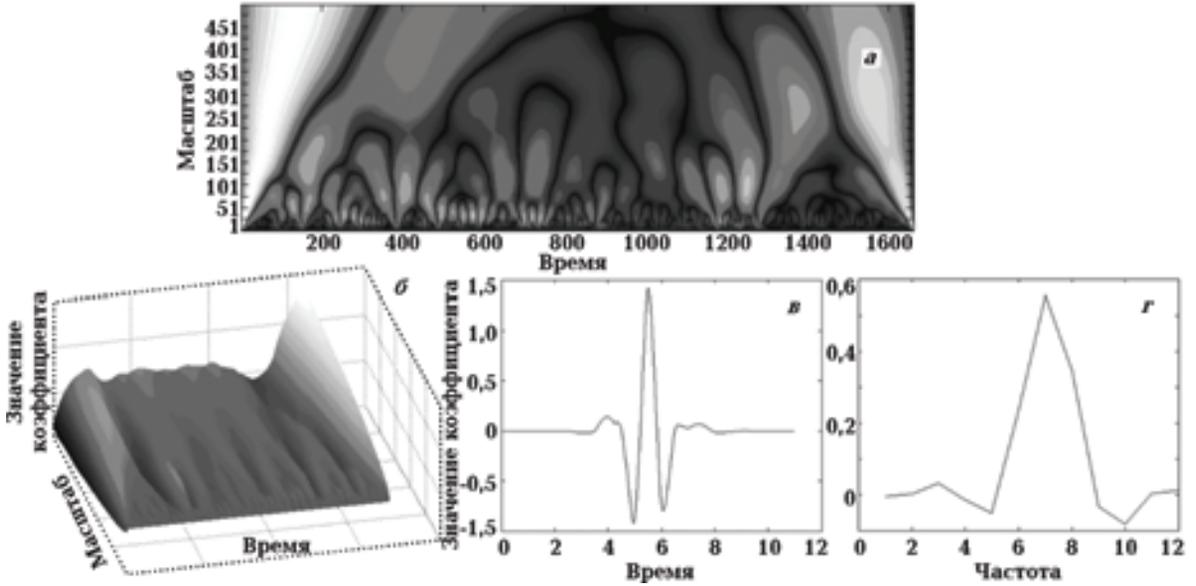


Рис. 2. Отображение одного и того же вейвлет-спектра в виде скелетона (а) и трехмерного изображения (б), форма вейвлета  $\text{sumb}$  (в) и его частотная характеристика (г).

Известно, что события Хайнриха — средне-частотные (цикличность 5000 ... 10 000 лет) изменения в составе донных отложений в течение последних 70—60 тыс. лет с ритмичным чередованием слоев с валунами (порожденными быстрым образованием айсбергов в Северной Атлантике) и горизонтов, сложенных относительно тонкообломочным материалом. События Хайнриха имеют порядковые номера, воз-

растающие с давностью. Средний уровень этой многослойной структуры характеризуются событиями: первое (масштаб 6800) длительностью 7200 лет датируется периодом 45 630—38 430 лет и представляет собой Н-5. По датировке [Hemming, 2004] первое событие можно интерпретировать как Н-5 (5-е событие Хайнриха) около 45 тыс. лет назад. Второе (5800) длительностью 3300 лет датируется периодом 35 130—31 830 лет

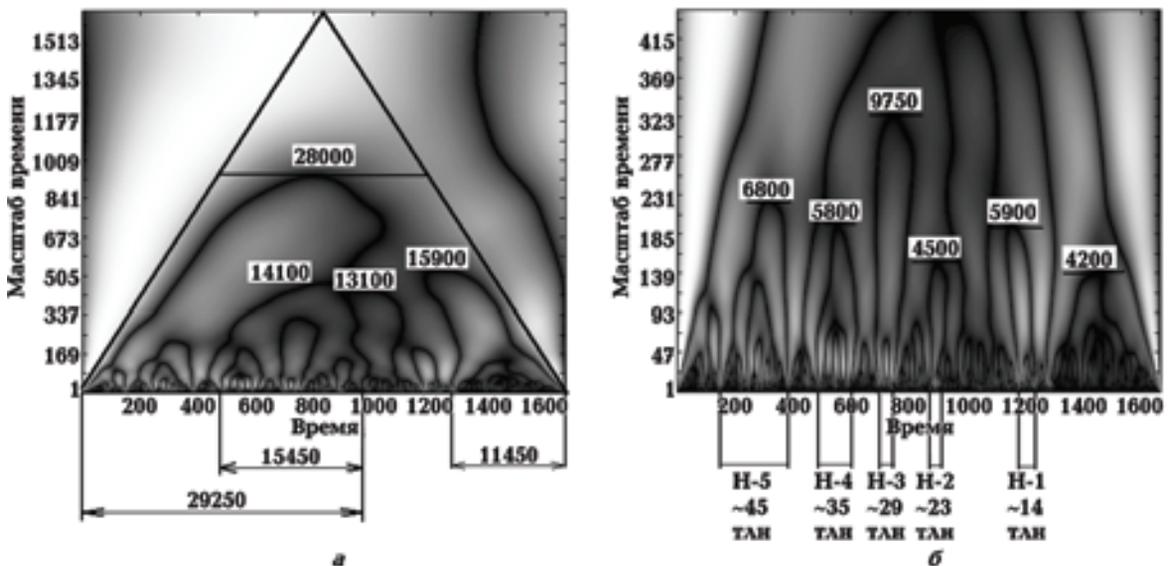


Рис. 3. Скелетон вейвлет-спектра, полученный при анализе всего ряда температур (1661 значение) с глубиной разложения 1661 (а) и 450 (б).

и представляет собой Н-4, совпадает с датировкой [Vidal et al., 1999; Васильчук, 2009]. Третье событие (9750) длительностью 1800 лет датируется периодом 29 130—27 330 лет, представляет собой Н-3 и совпадает с датировкой [Bond, Lotti, 1995; Васильчук, 2009]. Четвертое событие (4500) длительностью 900 лет датируется периодом 23 730—22 830 лет, представляет собой Н-2 и совпадает с датировкой [Hemming, 2004; Bond, Lotti, 1995]. Следует заметить, что эти события наблюдаются в ледниковом периоде. Как видим, для этих событий характерно уменьшение длительности. Далее можно отметить еще два события, близких по масштабу, имеющих отношение к послеледниковому периоду: пятое событие (5900) длительностью 1780 лет датируется периодом 14 580—12 800 лет, представляет собой Н-1 и совпадает с датировкой [Vidal et al., 1999; Васильчук, 2009]. Шестое событие (4200) длительностью 7200 лет датируется периодом 11 130—3930 лет, захватывает период Аллередского потепления, поздний дриас и Атлантический период — самый теплый и влажный период голоцена. Полученную нами датировку событий Хайнриха поместим в таблицу. Данные таблицы подтверждают, что события Хайнриха являются среднечастотными (цикличность 5000 ... 10 000 лет), только Н-0 (выделено жирным шрифтом) выпадает из этого правила — между Н-0 и Н-1 всего 3450 лет.

Возможно, в этот период наблюдалось собы-

тие, приведшее к климатическим изменениям, которые [Hemming, 2004] интерпретировал как Н-0. Для выявления причины возникновения события Н-0 проведем дополнительные исследования временного периода, в котором наблюдалось данное событие. Для этого рассмотрим скелетон, полученный при анализе части ряда температур, представляющей объединение переходного периода и нашего времени (708 значений), с глубиной разложения 600 (рис. 4). Определим длительность переходного периода в 21 270 лет. Основное событие этого ряда имеет масштаб 16 230 лет, максимум которого фиксируется около 8350 лет назад. Событие верхнего слоя можно интерпретировать как процесс устойчивого роста температуры воздуха в Северном полушарии, который хорошо представлен на рис. 4, а. Этот процесс продолжался вплоть до 6935 лет назад, что хорошо соответствует Атлантическому периоду (5000—8000 лет назад) — самому теплomu и влажному периоду голоцена.

Палеогеографическим эталоном периодизации голоцена служит модифицированный вариант широко известной шкалы (схемы) Блitta—Сернандера. Она построена по результатам исследований торфяников Дании, которые провели норвежец Аксель Блитт (в 1876 г.) и швед Рутгер Сернандер (в 1910 г.), и представляет собой последовательность основных климатических событий (по мнению авторов схе-

**Масштаб (годы) и время (тыс. лет назад) начала событий Хайнриха**

Номер события	Начало события	Окончание события	Масштаб события	Интервал события		Датировка событий Хайнриха
				начало	окончание	
1	45 630	38 430	6800	10 500	6600	Н-5 [Hemming, 2004]
2	35 130	31 830	5800	6000	4500	Н-4 [Vidal et al., 1999], [Васильчук, 2009]
3	29 130	27 330	9750	5400	4500	Н-3 [Bond, Lotti, 1995], [Васильчук, 2009]
4	23 730	22 830	4500	9150	10 030	Н-2 [Hemming, 2004], [Bond, Lotti, 1995]
5	14 580	12 800	5900	3450	1700	Н-1 [Vidal et al., 1999], [Васильчук, 2009]
<b>6</b>	<b>11 130</b>	<b>3930</b>	<b>4200</b>	—	—	<b>Н-0</b>

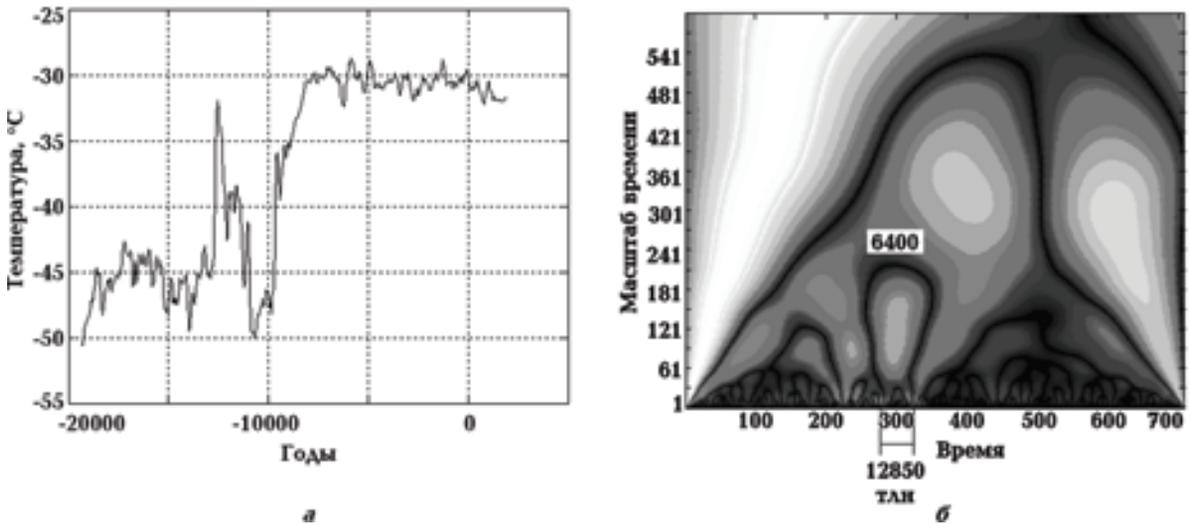


Рис. 4. Скелетон вейвлет-спектра, полученный при анализе части ряда температур, представляющей объединение переходного периода и нашего времени (всего 708 значений), с глубиной разложения 600.

мы периодов), имевших место в Северной Европе с конца позднего неоплейстоцена и до настоящего времени. Периодизация голоцена для Северной Евразии была уточнена Н.А. Хотинским [Хотинский, 1987].

Второй уровень скелетона вейвлет-спектра представлен тремя событиями. Первое событие (масштабом 3700 лет с максимумом 16 150 лет назад), которое началось около 17 150 лет назад и закончилось 14 600 лет назад, характеризуется окончанием последнего ледникового максимума, относящегося ко времени около 26—20 тыс. лет назад [Bowen, 1978; Quaternary ..., 2004; Mangerud et al., 2004]. Второе событие является наиболее мощным, с масштабом 6400 лет, его максимум наблюдался около 12 550 лет назад, начало события соответствует периоду 12 850 лет назад, конец — 11 450 лет назад. Именно этот временной отрезок выделяется стремительным падением температуры, конец позднего дриаса датируется возрастом примерно 11 550 лет назад, полученным с помощью различных методов [Taylor, 1997; Spurk, 1998; Hughen, 2000; Rapp, 2009]. В работе [Israde-Alcántara et al., 2012] указывается, что Международная группа ученых, работающая в рамках междисциплинарного проекта по изучению палеоклимата Земли, точно датировала и идентифицировала как имеющий однозначно внеземное происхождение слой отложений на дне озера Куицео (центральная часть Мексики), который мог образоваться после столкновения метеороида с земной поверхностью. Данные, полученные авторами статьи [Israde-Alcántara et

al., 2012], подтверждают, что внезапное тысячелетнее похолодание, начавшееся на Земле 12 900 лет назад и известное как поздний дриас, было спровоцировано падением крупного метеорита. Хронологически слой отложений, исследованный авторами статьи, совпадает с датировкой последнего по времени события Хайнриха H-0 около 12 900 лет назад [Hemming, 2004]. Таким образом, на скелетоне вейвлет-спектра присутствует подтверждение реакции климатической системы Северного полушария на глобальную катастрофу на рубеже плейстоцена и голоцена. Заметим также, что положительный пик температуры около 14 500 лет назад (см. рис. 1), по всей видимости, является признаком начавшегося потепления, которое было остановлено падением крупного метеорита.

Третье событие масштабом 4550 лет с максимумом 6050 лет назад началось около 11 350 лет назад и длится по наше время, максимум этого события имеет резкую границу окончания около 5600 лет назад и соответствует окончанию самого теплого и влажного периода голоцена Северной Европы — Атлантического периода. Климат в это время был в целом теплее нынешнего. Надо заметить, что структура первого и третьего событий формируется несколькими разномасштабными деталями, которые следуют одна за другой и, как бы дублируя друг друга, представляют собой периодическую структуру. Особенно ярко это выражено в третьем событии, которое имеет отношение к голоцену и эта периодическая структура представляет циклы Бонда [Bond et al., 1997]. Подслой тре-

тьего события представлен формой с масштабом около 2400 лет, начало которой фиксируется около 8100 лет назад и совпадает с глобальным похолоданием 6200 лет до н. э. — самым суровым глобальным похолоданием голоцена, аномальным для теплого Атлантического периода. Оно продолжалось от 200 до 400 лет, в течение которых климат значительно изменился, что привело к исчезновению ряда раннеолитических культур [Nesje, Dahl, 2001].

**Выводы.** Применение вейвлет-преобразования для анализа преобразованного ряда значений температуры воздуха в центральной части Гренландии позволило выявить и наглядно показать квазипериодическую структуру описываемого ряда. Масштабно-временная развертка, полученная в результате вейвлет-преобразования исследуемого ряда, позволила выявить не только осцилляции с хорошо фиксированным периодом, но и нестационарные осцилляции, и локализованные периодичности.

Анализ дал возможность определить не только масштаб осцилляций, но и выявить начало и конец конкретной осцилляции. Уточнен воз-

раст событий Хайнриха по данным вейвлет-анализа и проведено сравнение с датировками [Bond, Lotti, 1995; Vidal et al., 1999; Hemming, 2004; Васильчук, 2009]. Проведенная датировка событий Хайнриха по данным вейвлет-анализа показала некорректную интерпретацию климатических изменений около 12 тыс. лет назад как Н-0. Внезапное тысячелетнее похолодание, начавшееся на Земле 12 900 лет назад, возможно, было спровоцировано падением крупного метеорита, что нашло отражение в вейвлет-скелетоне.

Использование вейвлет-анализа для долгопериодных климатических рядов позволяет получить более точную датировку событий в многовековой цепи климатических изменений. Необходимо подчеркнуть, что вейвлет-преобразование позволяет взглянуть на исследуемый процесс и с другой точки зрения: наряду с общей картиной, представляющей динамику процесса в целом, можно провести более точную датировку отдельных осцилляций, соотнести их с конкретными климатическими явлениями и оценить энергетику этих явлений.

## Список литературы

- Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. *Успехи физ. наук*. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145—1170.
- Васильчук А. К. Палинология и хронология повторно-жильных льдов: Дис. ... д-ра геогр. наук. Москва, 2009. 362 с.
- 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.
- Кляшторин Л. Б., Любушин А. А. Циклические изменения климата и рыбопродуктивности. Москва: ВНИРО, 2005. 235 с.
- Мартыанов Н. Е. Размышления о пульсациях Земли. Красноярск: КНИИГиМС, 2003. 272 с.
- Монин А. С. Введение в теорию климата. Ленинград: Гидрометеоздат, 1982. 246 с.
- Рудяев Ф. И. Докл. РАН. 1998. Т. 357. № 6. С. 823—825.
- Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлет-анализ событий Хайнриха по данным вейвлет-анализа и проведено сравнение с датировками [Bond, Lotti, 1995; Vidal et al., 1999; Hemming, 2004; Васильчук, 2009]. Проведенная датировка событий Хайнриха по данным вейвлет-анализа показала некорректную интерпретацию климатических изменений около 12 тыс. лет назад как Н-0. Внезапное тысячелетнее похолодание, начавшееся на Земле 12 900 лет назад, возможно, было спровоцировано падением крупного метеорита, что нашло отражение в вейвлет-скелетоне.
- Использование вейвлет-анализа для долгопериодных климатических рядов позволяет получить более точную датировку событий в многовековой цепи климатических изменений. Необходимо подчеркнуть, что вейвлет-преобразование позволяет взглянуть на исследуемый процесс и с другой точки зрения: наряду с общей картиной, представляющей динамику процесса в целом, можно провести более точную датировку отдельных осцилляций, соотнести их с конкретными климатическими явлениями и оценить энергетику этих явлений.
- леты в MATLAB. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: ДМК Пресс, 2005. 304 с.
- Хотинский Н. А. Голоцен Северной Евразии. Москва: Наука, 1987. 198 с.
- Bond G., Lotti R., 1995. Iceberg discharge into the North Atlantic on millennial timescales during the Last Glaciation. *Science* 267, 1005—1010. doi: 10.1126/science.267.5200.1005
- 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.
- Bowen D. Q., 1978. Quaternary geology: a stratigraphic framework for multidisciplinary work. Oxford: Pergamon Press, 221 p.
- EPICA community members, 2004. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature* 429, 623—628.
- 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.
- Israde-Alcántara I., Bischoff J.L., Dominguez-Vázquez G., Li H.-C., DeCarli P.S., Bunch T.E., Wittke J.H., Weaver J.C., Firestone R.B., West A., Kennett J.P., Mercer C., Xie S., Richman E.K., Kinzie C.R., Wolbach W.S., 2012. Evidence from central Mexico supporting the Younger Dryas extraterrestrial impact hypothesis. University of Hawaii, Honolulu, HI, and approved January 31, 2012 (received for review July 13, 2011). www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1110614109.
- Jouzel J., Masson-Delmotte V., Cattani O., Dreyfus G., Falourd S., Hoffmann G., Minster B., Nouet J., Barnola J.M., Chappellaz J., Fischer H., Gallet J.C., Johnsen S., Leuenberger M., Loulergue L., Luethi D., Oerter H., Parrenin F., Raisbeck G., Raynaud D., Schilt A., Schwander J., Selmo E., Souchez R., Spahni R., Stauffer B., Steffensen J.P., Stenni B., Stocker T.F., Tison J.L., Werner M., Wolff E.W., 2007. Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years. *Science* 317, 793—796.
- Mangerud J., Gyllencreutz R., Lohne O., Svendsen J.I., 2004. Glacial History of Norway. In: *Quaternary Glaciations — Extent and Chronology: a Closer Look*. Amsterdam: Elsevier, 279—296.
- 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.
- Nesje A., Dahl S.O., 2001. The Greenland 8200 cal. yr BP event detected in loss-on-ignition profiles in Norwegian lacustrine sediment sequences. *J. Quaternary Sci.* 16 (2), 155—166. doi:10.1002/jqs.567.
- Quaternary Glaciations — Extent and Chronology: a Closer Look, 2004. Eds J. Ehlers, P.L. Gibbard, P.D. Hughes. Amsterdam: Elsevier, 1126 p.
- Rapp D., 2009. Ice Ages and Interglacials: Measurements, Interpretation and Models. New York: Springer-Verlag, 285 p.
- 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.
- 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.
- Stuiver M., Grootes P.M., Braziunas T.F., 1995. The GISP2 <sup>18</sup>O climate record of the past 16 500 years and the role of the sun, ocean and volcanoes. *Quaternary Res.* 44, 341—354.
- Taylor K.C., 1997. The Holocene-Younger Dryas transition recorded at Summit, Greenland. *Science* 278, 825—827. doi:10.1126/science.278.5339.825.
- 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.

## Application of wavelet analysis for updating Heinrich events age

© T. E. Danova, B. V. Perelygin, 2015

Results of studies of spectral components energy reconstructed in the central part of Greenland air temperature transformed sequence data investigation by using wavelet analysis by the data of ice cores have been presented. Oscillation with fixed period as well as non-stationary oscillations has been revealed. Heinrich events age has been updated. Wavelet analysis allowed to correlate events with concrete climate phenomena and to estimate energy of these phenomena.

**Key words:** ice cores, reconstructed air temperature, wavelet analysis, Heinrich events.

## References

- Astafeva N.M.*, 1996. Wavelet analysis: basic theory and some applications. *Uspehi fizicheskikh nauk* 166 (11), 1145—1170 (in Russian).
- Vasilchuk A. K.*, 2009. Palynology and chronology of ice wedges: Dr. geograph. sciences dis. Moscow, 362 p. (in Russian).
- Glock 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).
- Klyashtorin L. B., Lyubushin A. A.*, 2005. Cyclic climate change and fish. Moscow: VNIRO, 235 p. (in Russian).
- Martyanov N. E.*, 2003. Reflections on the pulsations of the Earth. Krasnoyarsk: KRIGMR, 272 p. (in Russian).
- Monin A. S.*, 1982. Introduction to the theory of climate. Leningrad: Gidrometeoizdat, 246 p. (in Russian).
- Rudyaev F. I.*, 1998. *Doklady RAN* 357 (6), 823—825 (in Russian).
- Smolentsev N. K.*, 2005. Fundamentals of the theory of wavelets. Wavelets in MATLAB. 2<sup>nd</sup> ed., rev. and enlarged. Moscow: DMK Press, 304 p. (in Russian).
- Khotinskiy N. A.*, 1987. Holocene Northern Eurasia. Moscow: Nauka, 198 p. (in Russian).
- Bond G., Lotti R.*, 1995. Iceberg discharge into the North Atlantic on millennial timescales during the Last Glaciation. *Science* 267, 1005—1010. doi: 10.1126/science.267.5200.1005
- 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.
- Bowen D. Q.*, 1978. Quaternary geology: a stratigraphic framework for multidisciplinary work. Oxford: Pergamon Press, 221 p.
- EPICA community members, 2004. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature* 429, 623—628.
- 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.
- Israde-Alcántara I., Bischoff J. L., Dominguez-Vázquez G., Li H.-C., DeCarli P. S., Bunch T. E., Wittke J. H., Weaver J. C., Firestone R. B., West A., Kennett J. P., Mercer C., Xie S., Richman E. K., Kinzie C. R., Wolbach W. S.*, 2012. Evidence from central Mexico supporting the Younger Dryas extraterrestrial impact hypothesis. University of Hawaii, Honolulu, HI, and approved January 31, 2012 (received for review July 13, 2011). www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1110614109.
- Jouzel J., Masson-Delmotte V., Cattani O., Dreyfus G., Falourd S., Hoffmann G., Minster B., Nouet J., Barnola J. M., Chappellaz J., Fischer H., Gallet J. C., Johnsen S., Leuenberger M., Loulergue L., Luethi D., Oerter H., Parrenin F., Raisbeck G., Raynaud D., Schilt A., Schwander J., Selmo E., Souchez R., Spahni R., Stauffer B., Steffensen J. P., Stenni B., Stocker T. F., Tison J. L., Werner M., Wolff E. W.*, 2007. Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years. *Science* 317, 793—796.
- Mangerud J., Gyllencreutz R., Lohne O., Svendsen J. I.*, 2004. Glacial History of Norway. In: *Quaternary Glaciations — Extent and Chronology: a Closer Look*. Amsterdam: Elsevier, 279—296.
- 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.
- Nesje A., Dahl S. O.*, 2001. The Greenland 8200 cal. yr BP event detected in loss-on-ignition profiles in Norwegian lacustrine sediment sequences. *J. Quaternary Sci.* 16 (2), 155—166. doi:10.1002/jqs.567.
- Quaternary Glaciations — Extent and Chronology: a Closer Look, 2004. Eds J. Ehlers, P. L. Gibbard, P. D. Hughes. Amsterdam: Elsevier, 1126 p.

- Rapp D., 2009. Ice Ages and Interglacials: Measurements, Interpretation and Models. New York: Springer-Verlag, 285 p.
- 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.
- 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.
- Stuiver M., Grootes P.M., Braziunas T.F., 1995. The GISP2  $^{18}\text{O}$  climate record of the past 16 500 years and the role of the sun, ocean and volcanoes. *Quaternary Res.* 44, 341—354.
- Taylor K.C., 1997. The Holocene-Younger Dryas transition recorded at Summit, Greenland. *Science* 278, 825—827. doi:10.1126/science.278.5339.825.
- 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.