

# Палеогляциология

УДК 551.383

doi:10.15356/2076-6734-2016-4-533-544

## Исследование разномасштабных взаимосвязей между изменениями приземной температуры воздуха и концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере

© 2016 г. Н.В. Вакуленко<sup>1</sup>, В.М. Котляков<sup>2</sup>, Ф. Парренин<sup>3</sup>, Д.М. Сонечкин<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия; <sup>2</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия;<sup>3</sup>Лаборатория гляциологии и геофизики Университета Фурье, г. Гренобль, Франция<sup>1\*</sup>dsonech@yandex.ru

## A study of different-scale relationship between changes of the surface air temperature and the CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere

N.V. Vakulenko<sup>1</sup>, V.M. Kotlyakov<sup>2</sup>, F. Parrenin<sup>3</sup>, D.M. Sonechkin<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Shirshov Oceanology Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;<sup>2</sup>Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; <sup>3</sup>CNRS, LGGE and Grenoble Alpes, LGGE Grenoble, France<sup>1\*</sup>dsonech@yandex.ru

Received March 10, 2016

Accepted September 20, 2016

**Keywords:** *atmospheric CO<sub>2</sub> concentration, crosswavelet analysis, global air temperature, the transition from the last glacial maximum to the Holocene.*

### Summary

A concept of the anthropogenic origin of the current global climate warming assumes that growth of concentration of the atmospheric carbon dioxide and other greenhouse gases is of great concern in this process. However, all earlier performed analyses of the Antarctic ice cores, covering the time interval of several glacial cycles for about 1 000 000 years, have demonstrated that the carbon dioxide concentration changes had a certain lag relative to the air temperature changes by several hundred years during every beginning of the glacial terminations as well as at endings of interglacials. In contrast to these findings, a recently published careful analysis of Antarctic ice cores (Parrenin et al., 2013) had shown that both, the carbon dioxide concentration and global temperature, varied almost synchronously during the transition from the last glacial maximum to the Holocene.

To resolve this dilemma, a special technique for analysis of the paleoclimatic time series, based on the wavelets, had been developed and applied to the same carbon dioxide concentration and temperature time series which were used in the above paper of Parrenin et al., 2013. Specifically, a stack of the Antarctic  $\delta^{18}\text{O}$  time series (designated as ATS) and the deuterium Dome C – EPICA ones (dD) were compared to one another in order to: firstly, to quantitatively estimate differences between time scales of these series; and, secondly, to clear up the lead-lag relationships between different scales variations within these time series. It was found that accuracy of the mutual ATS and dD time series dating lay within the range of 80–160 years. Perhaps, the mutual dating of the temperature and carbon dioxide concentration series was even worse due to the assumed displacement of air bubbles within the ice. It made us to limit our analysis by the time scales of approximately from 800 to 6000 years. But it should be taken into account that any air bubble movement changes the time scale of the carbon dioxide series as a whole. Therefore, if a difference between variations in any temperature and the carbon dioxide time series is found to be longer than 80–160 years, and if these variations are timescale-dependent, it means that the bubble displacements are not essential, and so these advancing and delays are characteristic of the time series being compared.

Our wavelet-based comparative and different-scale analysis confirms that the relationships between the carbon dioxide concentration and temperature variations were essentially timescale-dependent during the transition from the last glacial maximum to the Holocene. The carbon dioxide concentration variations were ahead of the temperature ones during transition from the glacial maximum to the Boelling – Allerød warming as well as from the Young Drias cooling to the Holocene optimum. However, the temperature variations were ahead during the transition from the Boelling – Allerød warming to the Young Drias cooling and during the transition from the Holocene optimum to the present-day climate.

Поступила 10 марта 2016 г.

Принята к печати 20 сентября 2016 г.

**Ключевые слова:** *глобальная температура воздуха, концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере, кроссвейвлетный анализ, переход от последнего гляциального максимума к голоцену.*

С целью выяснения причин современного изменения климата сопоставляются многомасштабные изменения средней глобальной приземной температуры воздуха и концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере по данным антарктических ледниковых кернов. Рассматривается период перехода от максимума последнего оледенения к голоцену. Для этого разработана специальная техника кроссвейвлетного анализа временных рядов. Установлено, что соотношения лидирования – запаздывания между изменениями температуры и концентрации  $\text{CO}_2$  существенно зависели на рассматриваемом временном интервале от временных масштабов и фаз ускорения или замедления изменений сравниваемых характеристик.

## Введение

В мировом сообществе климатологов преобладает мнение, что основная причина современного глобального потепления климата – рост в атмосфере концентрации парниковых газов, в первую очередь углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ). Путём сопоставления одновременных значений средней для всей Земли приземной температуры воздуха и атмосферной концентрации  $\text{CO}_2$ , оценённых по инструментальным данным за последние примерно 50 лет, разные учёные находили, что при удвоении концентрации  $\text{CO}_2$  температура должна расти на 2,0–4,6 °С. Поэтому в последнем пятом докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) средняя климатическая чувствительность оценена примерно в 3 °С. Совсем недавняя оценка [1], сделанная по спутниковым данным об уходящем излучении Земли и с учётом того, что облака, состоящие из смеси водяных капель и ледяных кристаллов, имеют меньшее альбедо по сравнению с водяными облаками, показала, что рост температуры при удвоении концентрации  $\text{CO}_2$  может быть ещё больше – до 5,3 °С. Вместе с тем в публикации [2] отмечается, что для климата плейстоцена, который, как известно, был теплее современного, климатическая чувствительность была примерно вдвое меньше. Это позволило авторам [2] сделать вывод, что эволюция климата к концу XXI в., который по своим характеристикам должен быть похож на климат плейстоцена, замедлится по сравнению со сценарием МГЭИК.

Все эти оценки климатической чувствительности хорошо соответствуют реконструкциям хода средней глобальной приземной температуры воздуха по данным инструментальных наблюдений для последних двух–трёх столетий. Например, в недавно опубликованной реконструкции [3] для средней температуры суши в период с 1753 по 2011 г. авторы считают, что

весь реконструированный рост этой температуры можно описать с помощью простого уравнения регрессии всего с двумя предикторами – логарифма концентрации  $\text{CO}_2$  и содержания в атмосфере аэрозоля от вулканических извержений.

Слабое звено в представлении о решающей роли парниковых газов в изменениях климата в прошлом и настоящем – априорное принятие предположения, что высокая корреляция между одновременными значениями концентрации  $\text{CO}_2$  и температуры имеет причинно-следственный характер. Это стало ставиться под сомнение ещё после того, как при анализе данных ледникового керна антарктической станции Восток было обнаружено, что при переходах между четырьмя последними ледниковыми и межледниковыми периодами вариации содержания дейтерия dD в ледниковом керне (косвенная характеристика температуры) предшествовали вариациям концентраций  $\text{CO}_2$  и метана в пузырьках воздуха, заключённых во льду. Сначала это было обнаружено при простом визуальном сравнении рядов этих характеристик [4–6]. На это последовали возражения, что относительные точности временных шкал сравниваемых рядов температуры и парниковых газов недостаточны, так как в процессе превращения выпавшего снега в лёд пузырьки воздуха могут мигрировать в толще льда. Однако позже вывод о лидировании вариаций дейтерия был подтверждён при кроссвейвлетном анализе этих рядов в работе [7].

Суть в том, что при кроссвейвлетном анализе смещение шкал двух сопоставляемых рядов проявляется как постоянный временной сдвиг картин вейвлетных преобразований этих рядов. Если же наблюдаемые в таких картинах сдвиги различаются по масштабам, то это означает, что причины сдвигов связаны с различной динамикой рядов, а не с ошибкой в их временных шкалах. Различия в сдвигах, зависящие от временного масштаба, действительно были об-

наружены. Они оказались относительно небольшими в самых коротких из масштабов, но значительно большими в масштабах многих тысяч лет, где отнести эти сдвиги на счёт взаимной неточности временных шкал дейтерия и парниковых газов уже невозможно.

Что касается современного климата, то, согласно последнему докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата, существует консенсус, что причина его изменений — антропогенный рост концентрации  $\text{CO}_2$ . Тем не менее, отдельные учёные всё ещё сомневаются в этом. Так, в работе [8] были сопоставлены инструментальные среднемесячные ряды хода средней глобальной приземной температуры воздуха и атмосферной концентрации  $\text{CO}_2$  с 1980 по 2011 г. при их 12-месячном скользящем осреднении. Оказалось, что межгодовые вариации  $\text{CO}_2$  запаздывали по сравнению с вариациями температуры, а не опережали их, что должно было бы наблюдаться, если бы вариации  $\text{CO}_2$  были причиной, а вариации температуры — следствием. Установлено также, что межгодовые вариации атмосферной концентрации  $\text{CO}_2$  не следовали вариациям в ходе того количества  $\text{CO}_2$ , которое должно было поступать в атмосферу в результате человеческой деятельности. Из этого авторы [8] сделали вывод, что источники межгодовых вариаций атмосферной концентрации  $\text{CO}_2$  в последние 30 лет были естественными, а не вызванными деятельностью человека. Этими источниками были, якобы, области океанов вблизи экватора. Данная работа вызвала шквал критики со стороны сторонников антропогенного происхождения современного потепления. Основной контраргумент (см., например, [9, 10]) — сопоставление авторами работы [8] не самих температур и концентраций  $\text{CO}_2$ , а их межгодовых изменений. При этом не учитывалось, что сама температура в некотором году определяется не количеством  $\text{CO}_2$ , поступившим в этот год в атмосферу в результате человеческой деятельности, а является функцией суммы всех таких поступлений, накопленной за все предшествующие годы. Учитывая данную критику, необходимо анализировать и сопоставлять вариации температуры и концентрации  $\text{CO}_2$  не только в межгодовом, но и в более длинных временных масштабах. Такое исследование — цель настоящей работы.

## Использованные данные

Недавно в работе [11] приведены данные детального исследования соотношений лидирования — запаздывания между изменениями температуры и концентрации  $\text{CO}_2$  в период перехода от самого последнего ледникового максимума к голоцену (примерно 20–10 тыс. лет до настоящего времени — настоящее время). Оно основано на более точных и детальных данных, полученных в рамках Европейского проекта бурения ледникового щита Антарктиды (European Project for Ice Coring in Antarctica — EPICA). Это исследование показало, что смена знаков локальных трендов при переходе, который включал в себя переход от начала потепления к бёллинг—аллерёду, от него — к раннему дриасу, а от него — к собственно голоцену, была практически одновременной. Не исключено, что в некоторых эпизодах температура даже запаздывала. Такой результат был с удовлетворением встречен сторонниками гипотезы об определяющей роли парниковых газов в изменениях климата.

Техника, использованная для сопоставления рядов температуры и  $\text{CO}_2$  в [11], была очень проста. Сначала из всех сравниваемых рядов исключались линейные тренды в масштабе всего перехода. Полученные квазистационарные ряды подразделялись на части, соответствовавшие переходам к бёллинг—аллерёду, от бёллинг—аллерёда — к раннему дриасу, а от раннего дриаса — к голоцену. Лидирование — запаздывание температуры относительно  $\text{CO}_2$  — рассматривалось только в точках перехода между этими частями. Таким образом, вариации в рядах температуры и  $\text{CO}_2$  сравнивались по всем временным масштабам интегрально, а по времени — дискретно.

В настоящей работе использованы те же самые исходные данные, что и в работе [11], а именно: ряд содержания во льду изотопа  $\delta^{18}\text{O}$ , построенный по данным всех антарктических станций (далее он обозначается как ряд ATS — Antarctic temperature stack); ряды содержания дейтерия (dD) и  $\text{CO}_2$  по материалам станции Купол С. Данные этих рядов сопоставлены друг с другом. В результате удалось определить взаимную точность временных шкал этих рядов и установить количественные соотношения между изменениями температуры и  $\text{CO}_2$  во временных масштабах от сотен до нескольких тысяч лет.

## Метод исследования

Чтобы выявить соотношения лидирования – запаздывания между изменениями средней глобальной приземной температуры воздуха и атмосферной концентрации  $\text{CO}_2$  в разных временных масштабах и в различные моменты времени – естественно использовать вейвлетное преобразование рядов этих изменений, а затем каким-то образом сопоставить их друг с другом. Вероятно, полезно использовать вейвлетное преобразование пары рядов  $X(t)$  и  $Y(t)$ , представленной, например, как комплексный ряд  $Z(t) = \text{Re}X(t) + \text{Im}Y(t)$ :

$$WT(b, a) = \text{Re}WT(b, a) + \text{Im}WT(b, a) = \\ = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} Z(t) G^* \left( (t-b)/a \right) dt, \quad a > 0, \quad (1)$$

где  $a$  – вейвлетный масштаб;  $b$  – сдвиг по времени;  $G(t-b/a)$  – комплексно значащая вейвлетная функция; значок  $*$  у такой функции означает комплексное сопряжение.

Если же вейвлетная функция выбирается вещественной, то преобразование (1) сводится к совокупности двух независимых вейвлетных преобразований для двух рядов, которое будет описано далее. Однако хорошо известно [12], что при использовании данного преобразования существуют определённые методические проблемы. Чтобы получить с его помощью значимые результаты относительно когерентности и фазовых соотношений между вариациями  $X(t)$  и  $Y(t)$  в разных временных масштабах, необходимо каким-то образом осреднять  $W(b, a)$ . Как это делать – неясно. Впрочем, в работе [13] этим обстоятельством пренебрегли и была написана программа кросс-вейвлетного преобразования. Она опубликована в Интернете в свободном доступе, и некоторые зарубежные и российские учёные использовали её для исследования различных климатических процессов с далеко идущими, но фактически не обоснованными выводами.

В настоящей работе использован иной подход к выявлению когерентности и фазовых соотношений между парами временных рядов, также основанный на вейвлетах. Этот подход впервые предложен в работе [7] и базируется на вещественном вейвлетном преобразовании каждого из сравниваемых временных рядов по отдельности, т.е.

$$WT(b, a) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} X(t) G \left( (t-b)/a \right) dt, \quad a > 0,$$

с последующим получением произведения двух таких вейвлетных преобразований и специальной его обработкой. В принципе, любое вейвлетное преобразование нечувствительно к постоянной составляющей преобразуемого ряда, однако длина всякого реального ряда конечна, т.е. вместо формулы (1) вычисления ведутся по следующей формуле:

$$WT(b, a) = a^{-1/2} \int_T X(t) G_1 \left( (t-b)/a \right) dt, \quad a > 0, b \in (1 \div T).$$

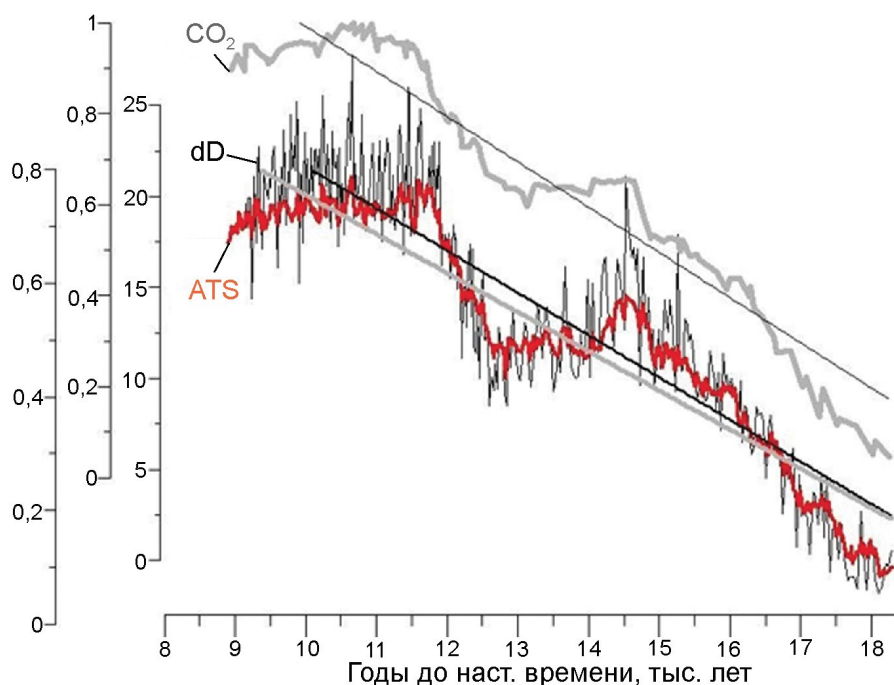
Из-за этого в начале и конце реально вычисленных рядов  $WT(b, a)$  возникают искажения. Они охватывают тем большие области, чем значительнее вейвлетный масштаб. Для уменьшения таких искажений используются различные приёмы. Так, краевые искажения существенно уменьшаются, если рассматриваемые ряды предварительно центрируются (из них вычитается их среднее значение), затем нормируются (все точки централизованного ряда делятся на среднее квадратическое отклонение) и, наконец, вычитается общий линейный тренд полученного централизованного и нормированного ряда, если он имеется. В настоящей работе выполнена именно такая предварительная обработка всех рассматриваемых рядов.

На рис. 1 показано, как выглядят использованные исходные ряды  $\text{ATS}$ ,  $\text{dD}$  и  $\text{CO}_2$  и исключаемые из них линейные тренды на временном интервале перехода от максимума последнего оледенения 18,3 тыс. лет назад (л.н.) до перехода к голоцену 8,8 тыс. л.н. Заметим, что после такой предварительной обработки некоторые краевые искажения картин вейвлетных преобразований всё-таки остаются, поэтому на приводимых в следующем разделе данной статьи рисунках потенциально искажённые краевые области указаны параболическими дугами.

В качестве вейвлетной функции в настоящей работе используется первая производная гауссиана:

$$G_1(t) = -\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} t \exp \left\{ -t^2/2 \right\}. \quad (2)$$

Эта функция  $G_1(t)$  обычно используется, чтобы выявить, как меняются локальные линейные тренды ряда, который подвергается вейвлетному преобразованию. При этом величина  $W(b, a)$  при каждом временном сдвиге  $b$  и для каждого временного масштаба  $a$  пропорциональна локальному (по времени и масшта-



**Рис. 1.** Графики содержания дейтерия dD и изотопа кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  в ледниковых ядрах антарктических станций, рассматриваемые как две косвенные характеристики средней глобальной приземной температуры воздуха, а также хода концентрации  $\text{CO}_2$  в этих ядрах.

Линии общих линейных трендов этих рядов показаны для временного интервала 18,3–10,8 тыс. лет до настоящего времени, в течение которого произошёл переход от максимума последнего оледенения к голоцену (по вертикали – безразмерные переменные)

**Fig. 1.** Time series of the deuterium dD and oxygen isotope  $\delta^{18}\text{O}$  contents in ice cores of the Antarctic stations considered as two indirect characteristics of the global mean near surface air temperature, and also the time series of the  $\text{CO}_2$  concentration in these cores.

Lines of the general linear trends of these time series are shown for a time interval of 18 300–10 800 BP, during which a transition took place from the last glacial maximum to the Holocene (vertically – dimensionless variables)

бу) линейному тренду этого ряда. Функция  $G_1(t)$  существенно отличается от нуля только в пределах  $\pm 2,5t$  от начала её оси абсцисс, поэтому временной интервал, внутри которого значения преобразуемого ряда влияют на величину локального тренда, в 5 раз больше рассматриваемого вейвлетного масштаба. На приведённых в следующем разделе данной статьи рисунках величина временного интервала оценки локального тренда указывается в скобках рядом с величиной соответствующего вейвлетного масштаба.

Для визуального восприятия соотношения локальных трендов двух разных рядов используется картина произведения величин вейвлетных преобразований этих рядов на плоскости (время – временной масштаб)

$$\text{CROSSWT}(b, a) = \text{WT1}(b, a) \cdot \text{WT2}(b, a).$$

Для лёгкости восприятия области этой картины, внутри которой тренды имеют одина-

ковые знаки, закрашиваются оттенками серого цвета, пропорциональными величине  $\text{CROSSWT}(b, a)$ , а области разных знаков оставляются белыми. Конкретные знаки трендов внутри серых областей указываются значками  $\dagger$  и  $\ddagger$  в случаях положительных и отрицательных трендов соответственно, а внутри белых областей – значками  $\dagger$  и  $\ddagger$ . Первый из этих значков означает, что тренд температуры положителен, а  $\text{CO}_2$  отрицателен; второй значок – что тренд температуры отрицателен, а  $\text{CO}_2$  положителен.

### Полученные результаты

Главная задача настоящей работы – оценить взаимную точность временных шкал сравниваемых рядов. Для этого использованы ряды ATS и dD. Предполагалось, что они отражают две разные косвенные характеристики одной

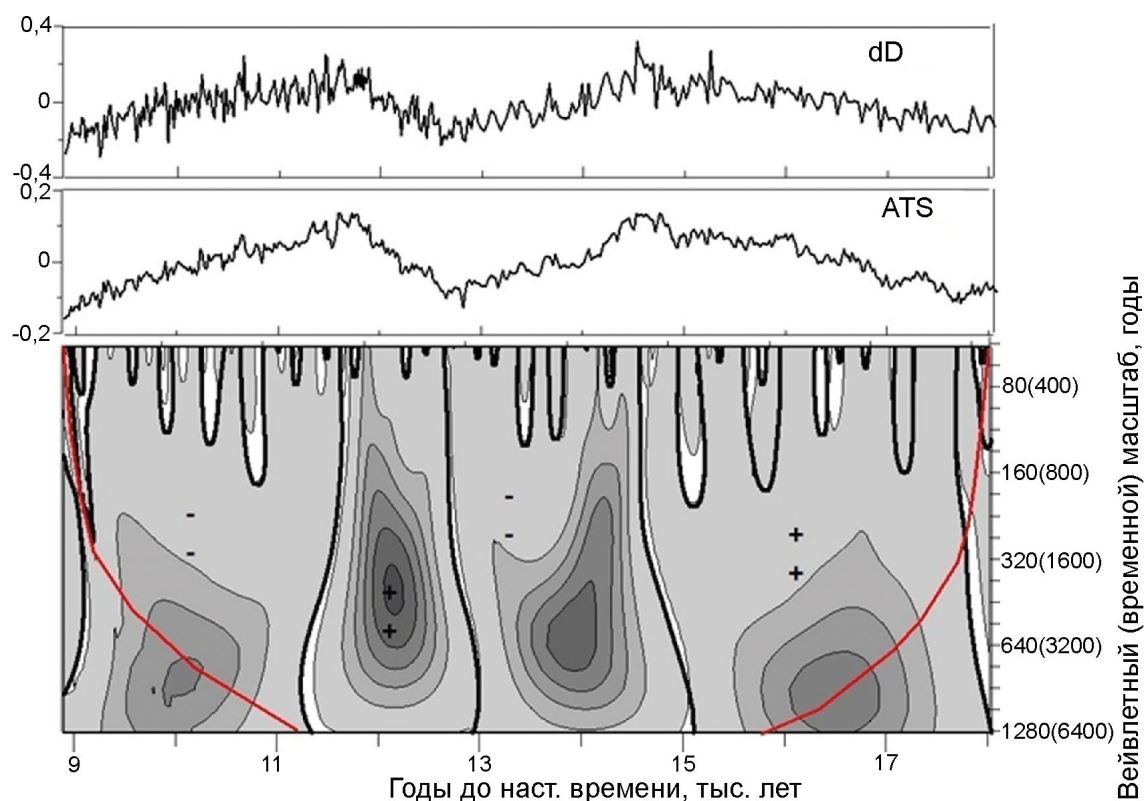
и той же средней глобальной приземной температуры воздуха. Такое предположение требует некоторого обоснования, ибо в ряде сравнительно недавних зарубежных публикаций, посвящённых вопросу о соотношениях лидирования — запаздывания между ходом температуры и  $\text{CO}_2$  — отмечалось, что ряд  $dD$ , построенный по данным антарктических ледниковых кернов, характеризует не среднюю глобальную приземную температуру воздуха, а среднюю температуру для Южного полушария или даже среднюю температуру только Антарктиды. Поэтому давно найденное в рядах  $dD$  и  $\text{CO}_2$  станции Восток лидирование  $dD$  не показательно для глобального климата. Однако в работе [14] с помощью количественных соотношений между пространственной протяжённостью и временем существования аномалий приземной температуры воздуха продемонстрировано, что земным полям температуры свойствен так называемый пространственно-временной скейлинг. Из существования этого скейлинга следует, что в масштабах более столетия колебания поля приземной температуры воздуха — глобальные. Региональные различия в колебаниях появляются при их длительности менее столетия. Следовательно, даже если антарктический ряд  $dD$  характеризует среднюю температуру только Южного полушария или, тем более, если он характеризует температуру только Антарктики, временные вариации в этом ряду с длительностью более столетия должны быть неотличимы от таких же вариаций средней глобальной температуры.

В верхней части рис. 2 показаны ряды  $dD$  и  $ATS$  на временном интервале 8,8–18,3 тыс. лет до настоящего времени после их предварительной обработки, описанной в предыдущем разделе, т.е. после их центрирования, нормирования и исключения общего линейного тренда. К главным особенностям этих рядов относятся: 1) минимум около 18 тыс лет до настоящего времени — начало общего перехода от последнего ледникового к межледниковью; 2) максимум около 15 тыс. лет до настоящего времени — пик потепления бёллинга—аллерёда; 3) минимум около 13 тыс. лет до настоящего времени — пик похолодания раннего дриаса; 4) максимум около 11 тыс. лет до настоящего времени — наступление голоцена.

В нижней части рис. 2 показана картина кроссвейвлетного преобразования (далее в тек-

сте указывается как *CROSSWT*) этих рядов. В качестве вейвлетной функции использована первая производная гауссиана (2), т.е. демонстрируются соотношения лидирования — запаздывания между локальными по времени линейными трендами сравниваемых рядов в разных временных масштабах. Отметим ещё раз, что области картины *CROSSWT*, внутри которых знаки локальных линейных трендов обоих рядов одинаковы, закрашены оттенками серого цвета; области, где знаки трендов разные, оставлены белыми. Жирные чёрные линии на границах между серыми и белыми областями указывают моменты времени, когда знак локального тренда в ряду  $ATS$  менялся на противоположный; тонкие линии — когда менялся знак локального тренда в ряду  $dD$ .

На картине *CROSSWT* внутри вейвлетных масштабов 1280–160 лет (указаны на оси ординат перед скобками), соответствующих временным масштабам 6400–800 лет (указаны на оси ординат в скобках), имеются пять идущих почти вертикально узких белых полосок. Знаки локальных трендов внутри этих полосок различны. Ширина полосок изменяется незначительно — в пределах 80–160 лет. По наличию тонких изолиний на правых краях этих полосок и толстых изолиний на их левых краях можно сделать заключение, что во всех случаях первым изменял знак своего локального линейного тренда ряд  $dD$ . Именно это обстоятельство трактовалось рядом зарубежных учёных как доказательство того, что ряд  $dD$  описывает вариации не средней глобальной температуры, а температуры Южного полушария или даже температуры только Антарктиды. Вместе с тем факт практически неизменной ширины белых полосок на рис. 2 в широком диапазоне масштабов указывает, что временные шкалы сравниваемых рядов  $ATS$  и  $dD$  просто сдвинуты относительно друг друга на 80–160 лет. Это позволяет считать, что оба ряда воспроизводят одну и ту же среднюю глобальную температуру, а сама величина 80–160 лет может рассматриваться как мера взаимной неточности временных шкал сравниваемых рядов. Эта величина далее будет использована для оценки реальности лидирований — запаздываний между вариациями температуры и  $\text{CO}_2$ . В малых вейвлетных (временных) масштабах [менее 160 (800) лет] все белые полоски



**Рис. 2.** Ряды ATS и dD (первой и второй косвенных характеристик средней глобальной приземной температуры воздуха) после их центрирования, нормирования и удаления общего линейного тренда (вверху) и картина кроссвейвлетного преобразования (*CROSSWT*) этих рядов (внизу).

Области, внутри которых локальные тренды обоих рядов имеют один и тот же знак, равно положительный или отрицательный, закрашены оттенками серого цвета пропорционально интенсивности трендов. Области разных знаков трендов оставлены белыми. Положения изолиний переходов через ноль знаков локальных трендов в ряду ATS показаны жирными чёрными линиями, а положения соответствующих переходов в ряду dD — тонкими чёрными линиями. Значки  $\pm$ ,  $\mp$  и  $\pm$  внутри каждой из обширных серых областей и внутри белых полос указывают, какими именно были знаки локальных трендов в обоих рядах в то или иное время и в том или ином вейвлетном (временном) масштабе

**Fig. 2.** Time series of ATS and dD (the first and second indirect characteristics of the global mean near surface air temperature respectively) after their centering, normalizing and removal of their general linear trends (above) and a pattern of crosswavelet transformation (*CROSSWT*) of these time series (below).

Domains of the pattern in which local trends of both time series have the same sign, either positive or negative, are colored by shades of gray in proportion to intensity of the trends. Domains of different signs of the trends are left white. Zero-isolines of the local ATS trends are shown by fat black lines, and the corresponding isolines of the local dD trends are shown by thin black lines. Badges  $\pm$ ,  $\mp$  and  $\pm$  within each of extensive gray domain and within each white strip, specify what are signs of the local trends during this or that time and in this or that wavelet (time) scale

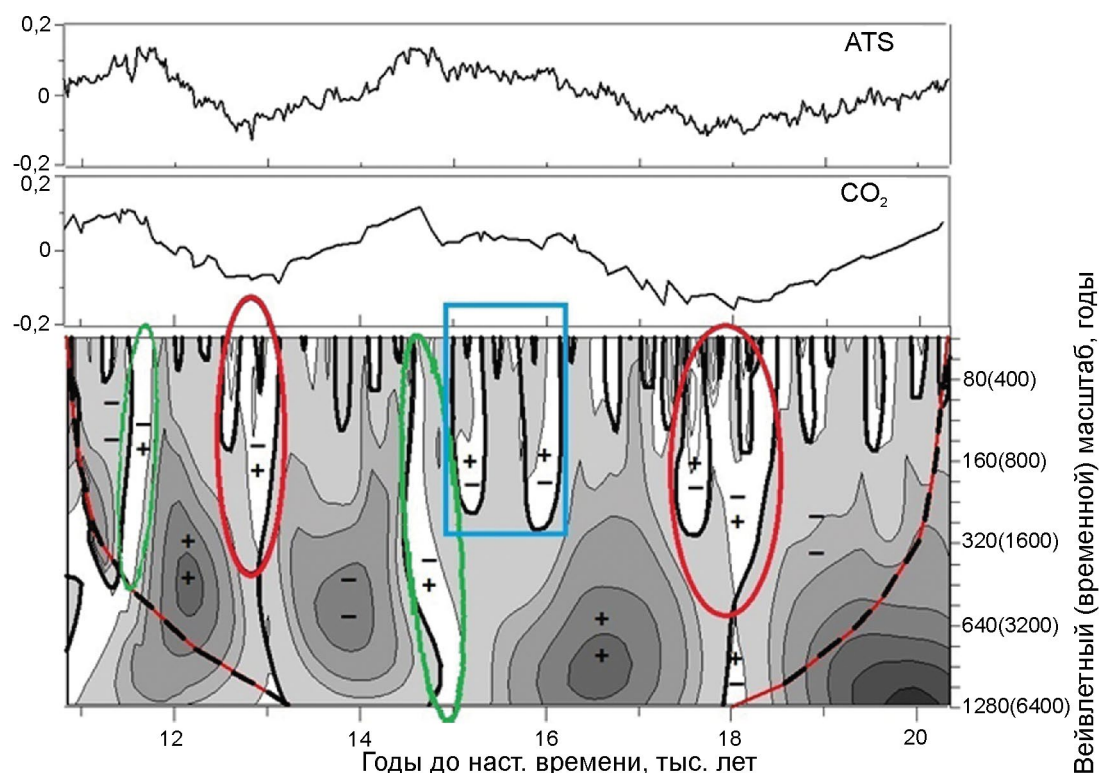
сохраняются, но появляются и дополнительные белые полоски. У одних из них лидирует ряд dD, у других — ATS. Этот разноречивый в лидировании можно объяснить тем, что временное разрешение рассматриваемых рядов недостаточно, чтобы анализировать столь мелкие временные масштабы. Таким образом, временное разрешение рядов ATS и dD не превышает 800 лет.

В верхней части рис. 3 показаны ряды ATS и CO<sub>2</sub> после исключения из них общих линейных трендов. В нижней части показана карти-

на их *CROSSWT*, построенная по тем же правилам, что и картина *CROSSWT* рядов ATS и dD на рис. 2. Отметим, что толстыми изолиниями на рис. 3 показаны переходы через ноль локальных трендов ряда CO<sub>2</sub>, а тонкими изолиниями — такие переходы ряда ATS. В значках типа  $\pm$  и им подобных верхний символ относится к ряду ATS, а нижний — к ряду CO<sub>2</sub>.

Начнём рассмотрение картины *CROSSWT* на рис. 3 с большой серой области, видимой в её правом нижнем углу. Эта область полностью





**Рис. 3** Ряды ATS и CO<sub>2</sub> (вверху) и картина их кроссвейвлетного преобразования (*CROSSWT*), построенные по тем же правилам, что и на рис. 2.

Красные овалы оконтуривают белые области картины *CROSSWT* с разными знаками локальных трендов в сравниваемых рядах, при переходах к которым лидировал ряд ATS (температура). Зелёные овалы оконтуривают белые области, при переходах к которым лидировал ряд CO<sub>2</sub>. Голубой прямоугольник оконтуривает два разрыва в области положительных трендов в обоих рядах при переходе от старта общего потепления климата к пику бёллинга–аллерёда

**Fig. 3.** Time series of ATS and CO<sub>2</sub> (above) and a pattern of their crosswavelet transformation (*CROSSWT*), constructed by the same rules, as in Fig. 2.

Red ovals delineate white domains of the pattern with different signs of local trends in the compared time series upon transitions to which ATS (temperature) led. Green ovals delineate white areas upon transitions to which CO<sub>2</sub> led. The blue rectangle delineates two gaps in the domain of positive trends in both time series upon transition from start of the general climate warming to the peak of Boelling–Allerod

занимает широкий диапазон вейвлетных (временных) масштабов от 1280 (6400) до примерно 160 (800) лет и временной интервал от более чем 20 тыс. лет до почти 18 тыс. лет до настоящего времени и помечена значком  $\pm$ . Это значит, что у обоих рядов локальные тренды в те времена были отрицательными. В более коротких масштабах внутри этой области видны небольшие белые и серые области, оконтуренные как толстыми, так и тонкими изолиниями. Их наличие можно трактовать как свидетельство недостатка временного разрешения рассматриваемых рядов ATS и CO<sub>2</sub> для анализа вариаций этих рядов в вейвлетных (временных) масштабах менее 160 (800) лет. Это подтверждает вывод, уже сделанный при сравнении рядов ATS и dD.

В самых больших вейвлетных (временных) масштабах [около 1280 (6400)–640 (3200) лет] рассматриваемая большая серая область ограничена слева сравнительно узкой белой областью. Граница между обеими областями показана тонкой изолинией. Это означает смену здесь знака локального тренда в ряду ATS, что и подтверждается значком  $\pm$  внутри этой белой области. Однако появившаяся белая область лежит вплотную к параболической пунктирной линии, которая оконтуривает область картины *CROSSWT*, потенциально искажённой из-за конечности рассматриваемых временных рядов. Поэтому можно поставить под сомнение, что примерно за 18 тыс. лет до настоящего времени смена знаков локальных трендов рядов ATS и



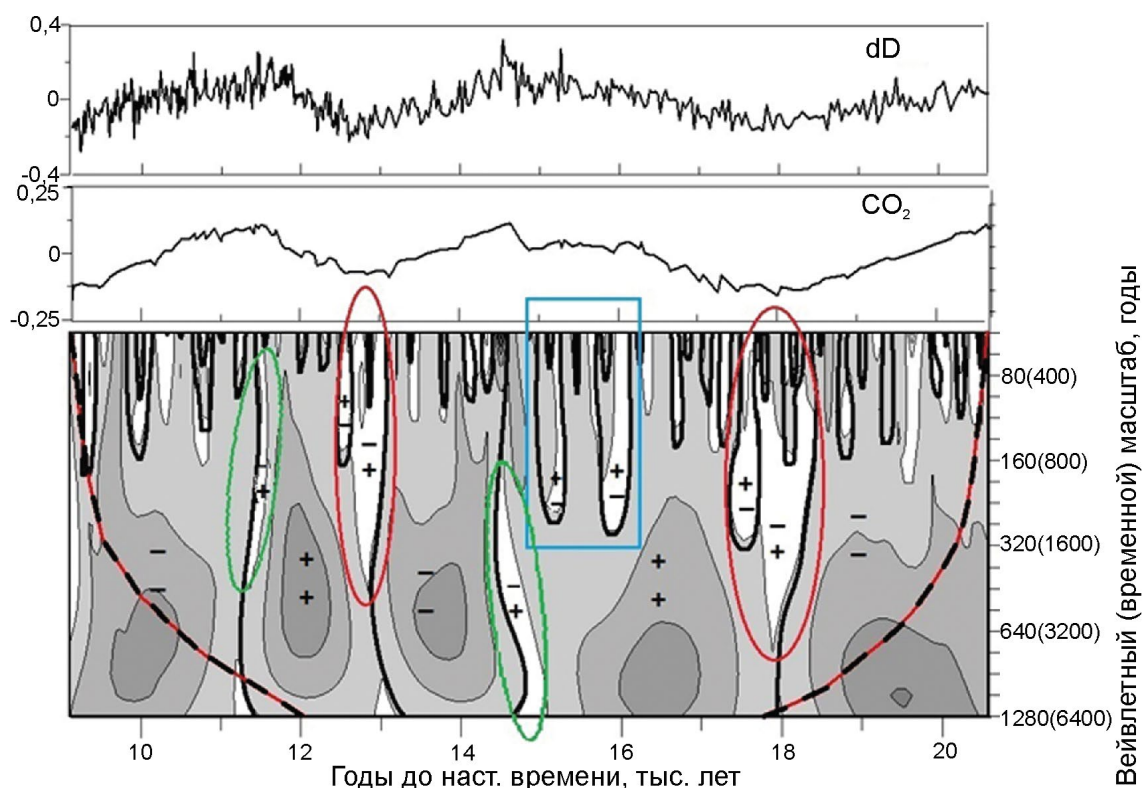
CO<sub>2</sub> действительно происходила в таком порядке, как было сказано. Ещё следует упомянуть, что авторы работы [15], в которой с использованием той же самой кроссвейвлетной техники сравнили ряды хода температуры и CO<sub>2</sub> в плиоцене, установили, что в вейвлетных (временных) масштабах порядка десятков тысяч лет температура оказалась лидирующей более часто, чем CO<sub>2</sub>. Это, кстати, ставит под сомнение вывод публикации [2], что климатическая чувствительность в плиоцене была ниже, чем у современного климата.

В масштабах более 640 (3200) лет большая серая область тоже ограничена слева областью белого цвета. Для облегчения её нахождения на рис. 3 эта белая область очерчена красным овалом. Разделяет серую и белую области толстая изолиния, т.е. в этих масштабах первым сменил свой знак на положительный ряд CO<sub>2</sub>. Значок  $\pm$  внутри этой белой области — тому подтверждение. Данный переход находится далеко от потенциально искажённой краевой области картины *CROSSWT*, поэтому ему можно доверять. Подтверждение реальности лидирования CO<sub>2</sub> при этой смене знаков трендов — ширина белой области. Между масштабами 320 (1600) и 160 (800) лет она достигает 600 лет. Это много больше, чем найденная при рассмотрении картины *CROSSWT* на рис. 2 взаимная точность временных шкал рядов ATS и dD в 80–160 лет. Существенные изменения ширины рассматриваемой белой полосы в зависимости от масштабов доказывают, что найденное лидирование CO<sub>2</sub> при начале перехода от максимума последнего оледенения к голоцену не есть следствие миграции воздушных пузырьков внутри ледяного керна.

Левее только что описанных относительно узких белых областей в масштабах более 160 (800) лет расположена вторая обширная область, закрашенная оттенками серого цвета. Её значок  $\pm$  указывает, что это — область, внутри которой тренды обоих рядов стали положительными. Данная область описывает начало перехода от последнего гляциального максимума (его пик приходится как раз на ранее описанные белые полосы вблизи момента в 18 тыс. лет до настоящего времени) к потеплению бёллинга–аллерёда. В вейвлетных (временных) масштабах менее 320 (1600) лет эта вторая обширная серая область трижды разрывается областями

продолжительностью во времени около 200 лет, что соизмеримо с взаимной неточностью временных шкал сравниваемых рядов. Первый разрыв виден в самом начале серой области вблизи момента в 17,5 тыс. лет до настоящего времени. Этот разрыв находится ещё внутри упомянутого красного овала. С обеих сторон разрыв ограничен жирной чёрной изолинией. Структура локальных трендов внутри этого разрыва — очень сложная. Она состоит из вложенных друг в друга белой, серой и снова белой областей. Поэтому здесь кажется, что сначала ряд CO<sub>2</sub> меняет свой тренд на отрицательный, потом возвращается к положительному и, наконец, совсем небольшое время снова становится отрицательным. При всех этих изменениях тренд ряда ATS неизменно остаётся положительным. Однако площади этих вложенных друг в друга областей очень малы. Они меньше указанного временного разрешения рядов ATS и CO<sub>2</sub>, поэтому разрыв в целом помечен значком  $\pm$ .

Ещё два разрыва в масштабах менее 320 (1600) лет видны на картине *CROSSWT* для рядов ATS и CO<sub>2</sub> во временном интервале примерно 16–15 тыс. лет до настоящего времени. Оба разрыва оконтурены голубым прямоугольником. Области внутри этих разрывов ограничены с обеих сторон жирными чёрными изолиниями. Обе эти области помечены значком  $\pm$ . Внутри каждая из этих областей состоит из белой и серой половинок. Таким образом, каждая из них описывает относительно кратковременный переход к отрицательному тренду ряда CO<sub>2</sub>, при том, что в ряду ATS тренд остаётся в масштабах менее 320 (1600) лет неизменно положительным. Заканчивается вторая обширная серая область примерно за 15 тыс. лет до настоящего времени, т.е. во время пика потепления бёллинга–аллерёда. Точно на этот пик приходится новая относительно узкая (максимальная её протяжённость во времени примерно 200 лет.) белая полоса, обведённая на рис. 3 зелёным овалом и помеченная значком  $\pm$ . Справа эта полоса ограничена тонкой, а слева — толстой чёрной изолинией. Следовательно, на пике бёллинга–аллерёда лидировал ряд ATS, т.е. глобальная температура, а не CO<sub>2</sub>. Ещё левее на картине *CROSSWT* рядов ATS и CO<sub>2</sub>, а именно, во временном интервале примерно 15–13 тыс. лет до настоящего времени, видна третья об-



**Рис. 4.** То же самое, что на рис. 3, но для рядов  $dD$  и  $CO_2$   
**Fig. 4.** The same that in Fig. 3, but for time series  $dD$  and  $CO_2$

ширная серая область в масштабах примерно 160 (800) лет. Она помечена значком  $-$ , т.е. соответствует похолоданию раннего дриаса. Заканчивается эта область примерно за 13 тыс. лет до настоящего времени.

В больших вейвлетных (временных) масштабах от менее чем 1280 (6400) лет и до почти 320 (1600) лет третья обширная серая область сразу переходит в четвёртую обширную серую область, знаменующую собой потепление от раннего дриаса к голоцену. Этот переход обозначен жирной чёрной изолинией, практически совпадающей с тонкой чёрной изолинией. В этих масштабах оба ряда —  $ATS$  и  $CO_2$  — одновременно меняют свои локальные тренды с отрицательных на положительные. Что касается вейвлетных (временных) масштабов 320 (1600) лет и менее, то в их пределах третья серая область ограничена слева белой областью (выделена зелёным овалом на рис. 3). Ширина появившейся белой области достигает примерно 300 лет, т.е. она явно больше взаимной точности временных шкал рядов  $ATS$  и  $CO_2$ . Правый край этой белой полосы оконтурен тонкой чёр-

ной изолинией. Это, а также значок  $+$ , показывают, что переход от пика похолодания в раннем дриасе к голоцену начинался с ряда  $CO_2$ , так же, как происходил переход от максимума последнего оледенения к потеплению бёллинга—аллерда. Наконец, в самой крайней правой части картины *CROSSWT* на рис. 3, которая ещё не искажена боковым эффектом вейвлетного преобразования, видно окончание четвёртой серой области положительных локальных трендов в рядах  $ATS$  и  $CO_2$  к довольно узкой белой области. Время этого окончания варьирует в пределах 11–11,8 тыс. лет до настоящего времени в зависимости от масштаба. Значок  $+$  и тонкая чёрная изолиния на правом краю белой полосы указывают, что в голоцене началось похолодание. Как и при переходе к раннему дриасу, в этом похолодании лидировал ряд  $ATS$ .

На рис. 4 показана картина *CROSSWT* рядов  $dD$  и  $CO_2$ . Она выглядит очень похожей с картиной *CROSSWT* рядов  $ATS$  и  $CO_2$  на рис. 3. Обе картины имеют практически все ранее обсуждённые обширные серые области и более узкие белые полосы. Разница только в том, что ширина

(продолжительности во времени) белых полос, оконтуренных справа жирными чёрными изолиниями, увеличилась на картине *CROSSWT*, показанной на рис. 4, по сравнению с аналогичными полосами на картине *CROSSWT* рис. 3. Соответственно ширина белых полос, оконтуренных справа тонкими чёрными изолиниями, уменьшилась. Это — очевидное следствие того факта, что временная шкала ряда dD опережает временную шкалу ряда ATS на 80–160 лет, о чём отмечалось в начале данного раздела статьи.

### Заключение

Усовершенствован метод кроссвейвлетного сравнения пар палеоклиматических временных рядов. Этот метод применён к недавно опубликованным рядам, построенным по анализам антарктических ледниковых кернов и характеризующим вариации средней глобальной приземной температуры воздуха и концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере во временном интервале между максимумом последнего оледенения и голоценом. В результате более точно оценены временное разрешение и взаимная точность временных

шкал рассмотренных рядов. С учётом полученных оценок временного разрешения и точности рядов установлено, что в диапазоне временных масштабов 3200–800 лет при всех переходах к потеплению лидировал ряд CO<sub>2</sub>, а при всех переходах к похолоданию — температура. Точности рядов оказались недостаточны для выявления соотношения лидирования — запаздывания в трендах температуры и концентрации CO<sub>2</sub> во временных масштабах менее 800 лет.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-05-00510). Она была доложена на Российско-французском семинаре «Ледниковые архивы данных о климате и окружающей среде» в Санкт-Петербурге (6–9 мая 2015 г.). Авторы благодарят Д. Райно (г. Гренобль, Франция) за внимание к их работе.

**Acknowledgements.** This was performed owing to financial support of the Russian Foundation for Basic Researches (grant № 15-05-00510). It had been presented at the Russian-French workshop (seminar) «Glacial archives of data on the climate and environment» (Sankt-Petersburg, 6–9 of May, 2015). Authors thank Dr. D. Raynaud (Grenoble, France) for his kind attention given to this work.

### Литература

1. Tan I., Storelmo T., Zelinka M.D. Observational constraints on mixed-phase clouds imply higher climate sensitivity // *Science*. 2016. V. 352. P. 224–227.
2. Martinez-Boti M.A., Foster G.L., Chalk T.B., Rohling E.J., Sexton P.F., Lunt D.J., Pancost D.J. Plio-Pleistocene climate sensitivity evaluated using high-resolution CO<sub>2</sub> records // *Nature*. 2015. V. 518. P. 49–54.
3. Rohde R., Muller R.A., Jacobsen R., Nuller E., Perlmutter S., Rosenfeld A., Wurtele J., Groom D., Wickham C. A new estimate of the average Earth surface land temperature spanning 1753 to 2011 // *Geoinformatics & Geostatistics: An Overview*. 2013. 1:1. doi:10.4172/2327-4581.1000101.
4. Caillon N., Severinghaus J.P., Jouzel J., Barnola J.-M., Kang J., Lipenkov V.Y. Timing of Atmospheric CO<sub>2</sub> and Antarctic Temperature Changes Across Termination III // *Science*. 2003. V. 299. P. 1728–1731.
5. Luethi D., Le Floch M., Bereiter B., Blunier T., Barnola J.-M., Siegenthaler U., Raynaud D., Jouzel J., Fischer H., Kawamura K., Stocker T. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present // *Nature*. 2008. V. 453. P. 379–382.

### References

1. Tan I., Storelmo T., Zelinka M.D. Observational constraints on mixed-phase clouds imply higher climate sensitivity. *Science*. 2016, 352: 224–227.
2. Martinez-Boti M.A., Foster G.L., Chalk T.B., Rohling E.J., Sexton P.F., Lunt D.J., Pancost D.J. Plio-Pleistocene climate sensitivity evaluated using high-resolution CO<sub>2</sub> records. *Nature*. 2015, 518: 49–54.
3. Rohde R., Muller R.A., Jacobsen R., Nuller E., Perlmutter S., Rosenfeld A., Wurtele J., Groom D., Wickham C. A new estimate of the average Earth surface land temperature spanning 1753 to 2011. *Geoinformatics & Geostatistics: An Overview*. 2013. 1:1. doi:10.4172/2327-4581.1000101.
4. Caillon N., Severinghaus J.P., Jouzel J., Barnola J.-M., Kang J., Lipenkov V.Y. Timing of Atmospheric CO<sub>2</sub> and Antarctic Temperature Changes Across Termination III. *Science*. 2003, 299: 1728–1731.
5. Luethi D., Le Floch M., Bereiter B., Blunier T., Barnola J.-M., Siegenthaler U., Raynaud D., Jouzel J., Fischer H., Kawamura K., Stocker T. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature*. 2008, 453: 379–382.

6. Petit R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.-M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pépin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // *Nature*. 1999. V. 399. P. 429–436.
7. Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Монин А.С., Сонецкий Д.М. Доказательства ведущей роли вариаций температуры по отношению к вариациям концентрации парниковых газов по данным ледяного керна со станции «Восток» // *ДАН*. 2004. Т. 397. № 5. С. 663–667.
8. Humlum O., Stordahl K., Solheim J.-E. The phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature // *Global Planetary Change*. 2013. V. 100. P. 51–69.
9. Masters T., Benestad R. Comment on Phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature // *Global Planetary Change*. 2013. V. 106. P. 141–142.
10. Richardson M. Comment on the phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature by Humlum, Stordahl and Solheim // *Global and Planetary Change*. 2013. V. 107. P. 226–228.
11. Parrenin F., Masson Delmotte V., Koeler P., Raynaud D., Paillard D., Schwander J., Barbante C., Landais A., Wegner A., Jouzel J. Synchronous change of atmospheric CO<sub>2</sub> and Antarctic temperature during the last deglacial warming // *Science*. 2013. V. 339. P. 1060–1063.
12. Torrence C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1998. V. 79. № 1. P. 61–78.
13. Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2004. № 11. P. 561–566.
14. Сонецкий Д.М., Броевский Р., Иващенко Н.Н., Якубяк Б. Пространственно-временной скейлинг полей приземной температуры воздуха // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 7. С. 18–25.
15. Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Сонецкий Д.М. О соотношениях лидирования – запаздывания между атмосферными трендами температуры и концентрации углекислого газа в период плейстоцена // *ДАН*. 2016. Т. 467. № 6. С. 709–712.
6. Petit R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.-M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pépin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*. 1999, 399: 429–436.
7. Vakulenko N.V., Kotlyakov V.M., Monin A.S., Sonechkin D.M. Proofs of leader role of temperature variations to the variations on greenhouse gases according to the ice core data from Vostok Station. *Doklady Akademii Nauk*. Proc. of the Academy of Sciences. 2004, 397 (5): 663–667. [In Russian].
8. Humlum O., Stordahl K., Solheim J.-E. The phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature. *Global Planetary Change*. 2013, 100: 51–69.
9. Masters T., Benestad R. Comment on phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature. *Global Planetary Change*. 2013, 106: 141–142.
10. Richardson M. Comment on the phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature by Humlum, Stordahl and Solheim // *Global and Planetary Change*. 2013, 107: 226–228.
11. Parrenin F., Masson Delmotte V., Koeler P., Raynaud D., Paillard D., Schwander J., Barbante C., Landais A., Wegner A., Jouzel J. Synchronous change of atmospheric CO<sub>2</sub> and Antarctic temperature during the last deglacial warming. *Science*. 2013, 339: 1060–1063.
12. Torrence C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1998, 79 (1): 61–78.
13. Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2004, 11: 561–566.
14. Sonechkin D.M., Broevsky R., Ivashchenko N.N., Yakubyak B. Spatial-temporal scaling of surface air temperature fields. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2005, 7: 18–25. [In Russian].
15. Vakulenko N.V., Kotlyakov V.M., Sonechkin D.M. Correlation of leading – delay between atmospheric trends and concentrations of carbon dioxide during Pliocene. *Doklady Akademii Nauk*. Proc. of the Academy of Sciences. 2016, 467 (6): 709–712. [In Russian].