

СОГЛАСОВАННОСТЬ ОРБИТАЛЬНЫХ ДАТИРОВОК ЛЕДЯНЫХ КЕРНОВ ВОСТОКА И EPICA DC, ОСНОВАННЫХ НА ЗАВИСИМОСТИ ГАЗСОДЕРЖАНИЯ ЛЬДА ОТ МЕСТНОЙ ИНСОЛЯЦИИ

© 2025 г. В. А. Хомякова¹, Н. А. Тебенькова^{1,2}, В. Я. Липенков^{1,*}, Д. Рэйно³

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

²Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Институт наук об окружающей среде, Гренобль, Франция

*e-mail: lipenkov@aari.ru

Поступила 02.12.2024 г.

После доработки 09.12.2024 г.

Принята к печати 25.12.2024 г.

Представлены взаимно согласованные орбитальные шкалы возраста ледяных кернов станции Восток и проекта EPICA DC, построенные путем совмещения экспериментальных рядов газосодержания льда с расчётными кривыми местной летней инсоляции. Показано, что точность полученных датировок сопоставима с точностью оптимизированной многопараметрической временной шкалы AICC2023, которая считается наиболее совершенной на сегодняшний день для этих кернов.

Ключевые слова: газосодержание, местная летняя инсоляция, орбитальная настройка, временная шкала ледяного керна

DOI: 10.31857/S2076673425010017, EDN: GZQKLC

ВВЕДЕНИЕ

Керны древнего атмосферного льда, добываемые при колонковом бурении глубоких скважин в современных ледниковых покровах, содержат наиболее полную информацию о прошлых изменениях климата и газового состава атмосферы Земли в масштабах времени от десятков лет до сотен тысяч и миллионов лет. Полученные при их изучении данные используются для исследования причин и механизмов эволюции климата и для проверки способности климатических моделей воспроизводить прошлые (а, значит, предсказывать будущие) изменения климата нашей планеты. Одной из центральных проблем палеоклиматической интерпретации керновых данных остается определение возраста ледяных отложений и возраста захваченного ими атмосферного воздуха. От точности датировок зависят наши возможности правильно определять последовательность и продолжительность климатических событий и изучать фазовые соотношения между астрономическим форсингом (длиннопериодные вариации инсоляции, обусловленные периодическими изменениями параметров орбиты Земли) и различными климатическими реакциями (изменения температуры воздуха и концентрации парниковых газов в атмосфере, колебания уровня моря и т.д.).

На протяжении многих лет для датирования колонок ледяных кернов, полученных в областях с низкой аккумуляцией снега, использовался комбинированный метод, включающий моделирование ледникового покрова на основе заданных временных изменений характеристик климата на поверхности ледника и условий на его ложе и последующее согласование реконструированных палеоклиматических рядов с другими климатическими сигналами, независимо датированными, в том числе с помощью методов орбитальной настройки (Kawamura et al., 2007; Parrenin et al., 2007; Salamatin et al., 2009). Преимущество такого подхода состоит в системном использовании всего комплекса палеоклиматической информации, заключенной в датированном керна льда. Вследствие этого установленная хроностратиграфическая шкала оказывается неразрывно связанной с палеоклиматическими рядами, восстановленными по керновым данным, что позволяет взаимно согласовывать результаты исследований, выполненных различными методами.

В последнее время получил развитие байесовский подход к согласованию и синхронизации максимального числа независимых датировок, полученных различными методами для кернов, добытых в разных пунктах бурения антарктического

и гренландского ледниковых покровов. Для реализации этого подхода были разработаны вероятностные модели и соответствующие им программные продукты Daticе (Lemieux-Dudon et al., 2010) и Paleochrono (Parrenin et al., 2021), использование которых привело к созданию многопараметрических оптимизированных хроностратиграфических шкал AICC2012 (Bazin et al., 2013; Veres et al., 2013) и AICC2023 (Bouchet et al., 2023), синхронизированных по данным кернов четырех антарктических (EDC, EDML, Купол Талос и Восток) и одной гренландской (NGRIP) глубоких буровых скважин. Последняя из разработанных шкал (AICC2023) в настоящее время рекомендована в качестве «официальной» для палеоклиматических реконструкций по керну европейского бурового проекта EPICA на Куполе С (EDC).

Очевидно, что, наряду с развитием многопараметрического подхода к датированию ледяных кернов, актуальной задачей остается разработка и совершенствование оригинальных методов определения возраста льда, результаты которых используются при создании оптимизированных временных шкал. Особое внимание последнее время уделяется развитию методов орбитального датирования, основанных на связи некоторых свойств ледникового льда с местной инсоляцией.

Возможность создания практически абсолютной временной шкалы ледяных кернов, привязанной к местной инсоляции, впервые была продемонстрирована в работе М. Бендера (Bender, 2002), который связал изменения в соотношении O_2/N_2 ($\delta O_2/N_2$) в захваченном льдом воздухе с долгопериодными изменениями летней инсоляции в пункте бурения. Дальнейшие исследования показали, что и изменчивость общего газосодержания ледяной породы в вертикальном профиле ледника также в значительной степени определяется вариациями местной инсоляции (Raynaud et al., 2007; Lipenkov et al., 2011).

Газосодержание льда (V) обычно выражают приведенным к нормальным условиям объемом захваченного льдом воздуха, приходящимся на 1 г ледяной породы. Связь газосодержания с условиями льдообразования определяется законом идеального газа (Martinerie et al., 1992):

$$V = V_c \frac{P_c T_0}{T_c P_0}, \quad (1)$$

где $T_0 = 273$ К, $P_0 = 1013$ мб – нормальные условия, V_c – объем газовых включений во время изоляции пор фирна от атмосферы, P_c и T_c – давление и температура воздуха во время изоляции. Для современных климатических условий установлена эмпирическая зависимость V_c от среднегодовой температуры поверхности ледника T_s (Martinerie et al., 1992):

$$V_c (\text{см}^3 \text{г}^{-1}) = 7.6 \cdot 10^{-4} T_s (\text{К}) - 0.57. \quad (2)$$

Помимо этого, в работах (Raynaud et al., 2007; Lipenkov et al., 2011) было показано, что значительный вклад в общую изменчивость V вносят вариации V_c , которые не связаны со среднегодовой температурой, но хорошо коррелируют с изменениями местной летней инсоляции.

Строгой физической модели, связывающей $\delta O_2/N_2$ и V_c с местной инсоляцией, до сих пор не создано, но механизмы этой связи достаточно подробно описаны (см., например, Lipenkov et al., 2011). Инсоляционный сигнал закладывается в указанные свойства ледникового льда через влияние летней температуры поверхности ледника (в Антарктиде она в значительной степени определяется летней инсоляцией) на процессы метаморфизма снега, формирующие его первоначальную структуру. Повышенная летняя температура и большие температурные градиенты у поверхности ледника приводят к формированию более крупнозернистого снега, который на стадии своего превращения в фирн обладает пониженной (критической) плотностью по сравнению с мелкозернистым. Дальнейшее уплотнение такого фирна приводит к образованию на нижней границе фирновой толщи ледникового льда с пониженным объемом замкнутых воздушных включений V_c и, следовательно, пониженным газосодержанием. Кроме того, воздух, захваченный таким льдом, характеризуется относительно пониженным значением $\delta O_2/N_2$ за счёт более растянутого по времени процесса фракционирования газов атмосферного воздуха в фирне. Отметим, что сильная антикорреляция между газосодержанием льда в керне EDC и средней летней температурой недавно была прослежена на протяжении последних 440 тыс. лет благодаря расчетам летней температуры по модели LOVECLIM1.3 (Raynaud et al., 2024). Результаты этой работы подтверждают, что среднегодовая и средняя летняя температуры поверхности ледника оказывают разнонаправленное влияние на V_c и V , тем самым частично нивелируя суммарный эффект своего воздействия.

Таким образом, инсоляционный сигнал, наблюдаемый в экспериментальных профилях газосодержания кернов, закладывается на поверхности ледника без временного запаздывания: чем выше инсоляция (летняя температура) во время метаморфизма снега, тем меньше будет газосодержание ледникового льда, который образуется из этого снега спустя несколько тысяч лет. Из этого следует, что совмещение предварительно датированного ряда газосодержания с временным рядом инсоляции, рассчитанным для широты пункта бурения, дает возможность получить орбитальную датировку льда (но не заключенного во льду воздуха), которая по своей сути – принимая во внимание высокую точность астрономических расчетов – является абсолютной.

Чтобы точнее оценить неопределённости, связанные с практической реализацией этого метода датирования, мы сравнили индивидуальные орбитальные временные шкалы, полученные по газосодержанию льда для кернов Востока (Lipenkov et al., 2011) и EDC (Raynaud et al., 2007), полагая, что связанные с местной инсоляцией колебания V должны быть одинаковыми и происходить синхронно в пунктах бурения, расположенных на близких широтах. Идея такого исследования была впервые предложена в докладе, представленном на Второй открытой научной конференции Международного партнерства в исследованиях ледяных кернов (IPICS OSC2) в Хобарте в 2016 г. (V. Lipenkov, D. Raynaud, A comparison of air content records from the Vostok and EPICA DC ice cores). В статье также впервые представлены взаимно согласованные для этих двух кернов орбитальные датировки, точность которых, как оказалось, не уступает точности многопараметрических временных шкал AICC2012 и AICC2023.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Бурение скважин, о которых идет речь в настоящей работе, производилось на станции Восток (78°28' ю. ш., 106°48' в. д., 3488 м над ур. моря) и в районе станции Конкордия (75°06' ю. ш., 123°21' в. д., 3233 м над ур. моря), где осуществлялся европейский буровой проект EPICA на Куполе С (сокращенно EDC). Измерение общего количества газов (V) в образцах керна из этих скважин выполнялось на установке STAN, реализующей барометрический метод определения газосодержания льда (Lipenkov et al., 1995). Для измерений использовались образцы кубической формы размером примерно 2.5×2.5×2.5 см. В измеренные значения V вводилась поправка, учитывающая потерю воздуха из газовых включений и гидратов воздуха, срезанных поверхностью образца (Martinerie et al., 1990). Расчетная погрешность абсолютных значений газосодержания, измеренных на установке STAN, составляет 0.6%, однако общая погрешность экспериментальных значений V возрастает до 1% за счёт ошибки вводимой поправки.

Вертикальные профили газосодержания льда, измеренные по этим кернам, были преобразованы во временные ряды V с помощью предварительных временных шкал, в качестве которых для керна Востока использовалась шкала, основанная на орбитальной настройке экспериментального ряда $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ этого керна (Petit et al., 1999), а для керна EDC — гляциологическая шкала EDC2 (EPICA community members, 2004). В настоящей работе ряды газосодержания кернов Востока и EDC сравниваются на временном отрезке 150–390 тыс. лет назад, для которого имеются равноточные данные,

полученные с одинаковым временным разрешением порядка 2 тыс. лет.

Спектральный анализ полученных рядов V позволил установить, что в них доминируют колебания с периодами наклона земной оси (41 тыс. лет) и, в меньшей степени, прецессии (23 тыс. лет), которые совпадают с аналогичными колебаниями на кривой местной инсоляции (Raynaud et al., 2007; Lipenkov et al., 2011). Поэтому перед совмещением рядов газосодержания с расчетными рядами инсоляции и те и другие были отфильтрованы в полосе пропускания частот 1/15–1/16 тыс. лет⁻¹, чтобы минимизировать влияние шумов в данных.

Важным моментом является выбор инсоляционной кривой. Поскольку в Центральной Антарктиде заметные структурные преобразования снега происходят только в тёплый летний период, для сопоставления с рядами газосодержания льда было предложено использовать интегральную летнюю инсоляцию — ISI (Raynaud et al., 2007). Расчёт рядов ISI (Дж м⁻²) производится с использованием уравнений небесной механики (Laskar et al., 2004) путем суммирования дневных (среднесуточных) расчетных инсоляций w_i (Вт м⁻²) для всех дней (i) с $w_i \geq w_{\text{кр}}$ по формуле (Huybers, 2006):

$$\text{ISI} = \sum \beta_i (w_i 86400), \quad (3)$$

где $\beta_i = 1$, если $w_i \geq w_{\text{кр}}$, и $\beta_i = 0$, если $w_i < w_{\text{кр}}$. От порогового значения $w_{\text{кр}}$ зависят спектральные характеристики инсоляционного ряда — с увеличением порога увеличивается доля прецессионной компоненты. Варьируя $w_{\text{кр}}$ в уравнении (3), подбирают наиболее соответствующий экспериментальному ряду V ряд ISI. Для исследуемых рядов газосодержания Востока и EDC были получены значения $w_{\text{кр}}$ равные 390 и 380 Вт м⁻² соответственно. Благодаря близости широт пунктов бурения расчётные кривые ISI390 и ISI380 практически не отличаются друг от друга и могут рассматриваться как один и тот-же инсоляционный ряд. В обоих случаях период суммирования среднесуточных инсоляций охватывает самые теплые месяцы в пунктах бурения (ноябрь, декабрь, январь), когда среднесуточная температура поверхностного снега в современную климатическую эпоху поднимается выше –40 °С.

Спектральный анализ, предварительная фильтрация и синхронизация рядов V и ISI осуществлялись с помощью метода непрерывного вейвлет-преобразования временных рядов (continuous wavelet transform — CWT), который позволяет получать частотно-временные представления спектральных характеристик рядов и рассчитывать мгновенную разность фаз (временное запаздывание) между ними. Пошаговый алгоритм реализации метода CWT с использованием вейвлета Морле, форма которого наилучшим образом подходит

для анализа климатических рядов (Melice, Servain, 2003), описан в работе (Скакун, Липенков, 2016).

На рис. 1 показаны отфильтрованные и нормированные ряды V и ISI для кернов Востока (см. рис. 1, а) и EDC (см. рис. 1, б), а также результаты расчёта мгновенного временного запаздывания предварительно датированных рядов V относительно расчетных рядов ISI для этих кернов

(см. рис 1, в). Корректируя предварительную датировку рядов газосодержания на величину запаздывания, получаем орбитальную (абсолютную) временную шкалу керна, обеспечивающую наилучшее совмещение экспериментальных рядов газосодержания льда с расчётными рядами инсоляции.

Отметим, что установленные таким образом индивидуальные орбитальные шкалы для кернов

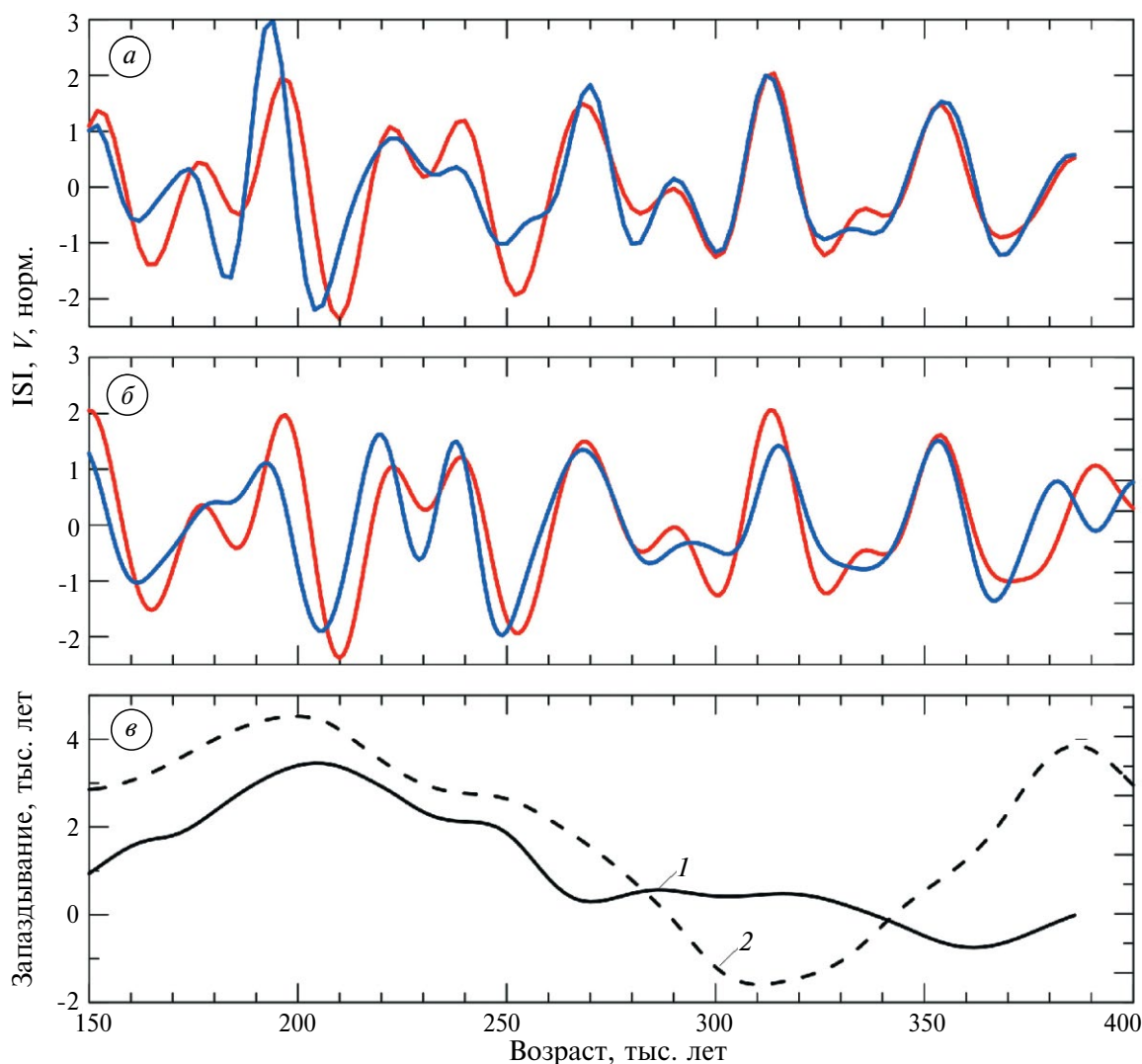


Рис. 1. Результаты CWT анализа временных рядов газосодержания (V) ледяных кернов со станций Восток и Конкордия (EDC) и местной инсоляции (ISI) по данным работ (Raynaud et al., 2007; Lipenkov et al., 2011): а – отфильтрованные в полосе пропускания 15–46 тыс. лет и нормированные ряды V (синяя кривая) и ISI390 (красная кривая, ряд перевернут) для керна Востока. Для ряда V использована предварительная датировка по $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ (Petit et al., 1999); б – то же для керна EDC и ISI380. Для ряда V использована датировка EDC2 (EPICA community members, 2004); в – временное запаздывание отфильтрованных рядов V относительно рядов ISI для кернов Востока (1) и EDC (2), рассчитанное методом CWT

Fig. 1. Results of the CWT analysis of the air content (V) and local insolation (ISI) time series for Vostok and EDC ice cores adapted from (Raynaud et al., 2007; Lipenkov et al., 2011): а – filtered in 15–46 ka band and normalized time series of V (blue) and ISI390 (red, inverted) for Vostok. The V time series is plotted using $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ timescale (Petit et al., 1999); б – same as above for the EDC ice core and ISI380. The V time series is plotted using EDC2 timescale (EPICA community members, 2004); в – time delays between V and ISI filtered time series for Vostok (1) and EDC (2) ice cores, obtained with CWT method

Востока и EDC создавались независимо друг от друга и, следовательно, они могут быть использованы для оценки воспроизводимости предложенного метода датирования. Вместе с тем, общим для этих временных шкал является использованный алгоритм их построения, которому присущи собственные систематические и случайные погрешности. Детальный анализ всех источников погрешностей разрабатываемого метода орбитального датирования льда, проделанный в работе (Скакун, Липенков, 2016), позволил оценить его общую стандартную ошибку, которая составила ± 2.1 тыс. лет, включая погрешность самого метода CWT, варьирующую в пределах от ± 0.25 тыс. лет до ± 0.65 тыс. лет.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показаны экспериментальные и отфильтрованные нормированные ряды газосодержания льда в кернах Востока (см. рис. 2, а) и EDC (см. рис. 2, б), построенные с использованием индивидуальных орбитальных шкал возраста этих кернов, как было описано выше. Поскольку пункты бурения скважин расположены на близких широтах, можно было ожидать, что связанные с местной инсоляцией изменения газосодержания в этих кернах (отфильтрованные ряды I) будут синхронными и сопоставимыми по амплитуде. Простое визуальное сравнение представленных графиков говорит о том, что этот прогноз оправдывается не на всех участках временной шкалы. Рассмотрим подробней степень и причины наблюдаемых расхождений.

Для оценки степени синхронности рядов методом CWT было рассчитано мгновенное временное запаздывание отфильтрованного ряда газосодержания керна EDC по отношению к аналогичному ряду Востока. Результаты расчета, представленные на рис. 2, в (кривая линия), показывают, что среднее расхождение индивидуальных орбитальных датировок кернов по абсолютной величине составляет 0.57 ± 0.36 (σ) тыс. лет, т.е. в большинстве случаев не превышает 1 тыс. лет и в целом соответствует оценке погрешности метода CWT (Скакун, Липенков, 2016).

Совсем другие результаты дает определение временного запаздывания по методу совмещения экстремумов отфильтрованных рядов, который часто применяется при орбитальной настройке рядов $\delta O_2/N_2$ (Kawamura et al., 2007; Landais et al., 2012). При использовании этого метода запаздывание ряда EDC на отдельных временных интервалах достигает нескольких тысяч лет (см. ромбики на рис. 2, в). Большие расхождения в датировках пиков наблюдаются в тех случаях, когда их положение в отфильтрованных рядах газосодержания не может быть определено точно. Причинами, которые приводят к росту погрешности в определении

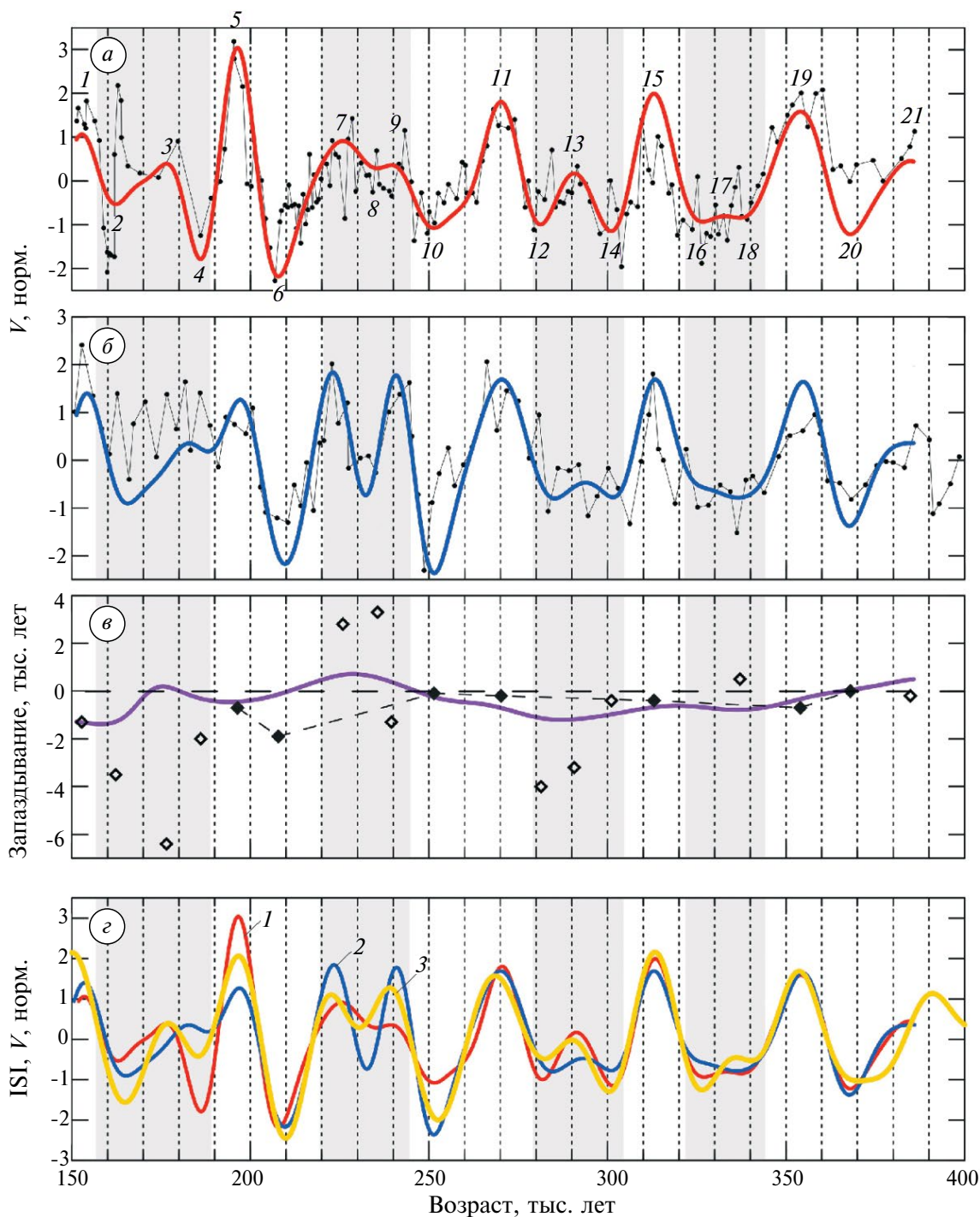
положения пиков на временной шкале, являются: 1) слабый инсоляционный сигнал; 2) увеличенный разброс данных, связанный с «неорбитальными» вариациями газосодержания льда и 3) недостаточное временное разрешение экспериментального ряда.

Ослабление инсоляционного сигнала в рядах газосодержания льда наблюдается на тех отрезках времени, для которых была характерна пониженная амплитуда изменений самой инсоляции. К таким периодам в истории Земли относятся, например, периоды с малым эксцентриситетом орбиты планеты и, соответственно, пониженным вкладом прецессионного движения земной оси в вековые изменения инсоляции (Landais et al., 2012). В исследуемом интервале времени (150–390 тыс. лет назад) ослабление инсоляционного сигнала (см. кривую 3 на рис. 2, г) наблюдалось на временных отрезках 157.5–189.0, 220.6–244.0, 279.5–303.0 и 320.5–344.0 тыс. лет назад, которые выделены (см. рис. 2) серыми вертикальными полосами. Уменьшение амплитуды вариаций ISI на этих участках приводит к увеличению относительного вклада «неорбитальных» вариаций $V(V_c)$ в общую изменчивость газосодержания льда.

К изменениям V_c , не связанным с инсоляционным сигналом и колебаниями среднегодовой температуры поверхности ледника T_s , относятся высокочастотные (стратиграфический шум) и среднечастотные вариации V_c , вызванные изменениями погодных условий, влияющих на физические свойства отложенного снега.

Стратиграфический шум в рядах газосодержания льда формируется под воздействием сезонных и межсуточных изменений погодных условий на поверхности ледника, главным образом, скорости ветра. Усиление ветра в зимние сезоны или в отдельные дни приводит к образованию на поверхности ледника плотных ветровых досок с пониженной воздухопроницаемостью, которые могут изолировать от атмосферы слои более рыхлого снега, где закрытие пор еще не завершилось. В результате рыхлые летние слои после превращения в лед будут иметь повышенное газосодержание по сравнению с зимними (Martinerie et al., 1992). Однако в районах с малой аккумуляцией снега, таких как районы станций Восток и Конкордия, где годовая аккумуляция даже в современную климатическую эпоху не превышает 2.5 см в ледяном эквиваленте, вклад стратиграфического шума в общую изменчивость газосодержания невелик, поскольку образцы керна, используемые для измерений, включают от одного до трёх годовых слоев льда (Lipenkov et al., 2011).

Увеличение повторяемости сильных ветров в Центральной Антарктиде на протяжении длительных периодов времени приводит к увеличению средней плотности поверхностного снега



и уменьшению средней пористости ледяной породы на стадии изоляции фирновых от атмосферы. В такие периоды формируется лёд с пониженным средним содержанием газа (Martinerie et al., 1994).

На рис. 3 показаны фрагменты экспериментальных рядов газосодержания кернов Восток и EDC на отрезке временной шкалы 150–182 тыс. лет. Во временном ряду Восток наблюдается весьма существенное (десятипроцентное) падение

газосодержания льда на отрезке 158–162 тыс. лет. Измерения выполнялись волюметрическим методом определения газосодержания льда по кернам скважин 3Г и 4Г (Martinerie et al., 1994) и барометрическим методом по керну скважины 5Г (Lipenkov et al., 2011). Хорошая воспроизводимость данных, полученных разными методами по кернам трёх скважин, пробуренных на расстоянии нескольких десятков метров друг от друга,

Рис. 2. Построение взаимно согласованных орбитальных временных шкал ледяных кернов со станций Восток и Конкордия (EDC): *a* – экспериментальный (точки) и отфильтрованный (кривая) нормированные ряды газосодержания (*V*) керна Востока, построенные с использованием индивидуальной орбитальной шкалы возраста этого керна; *b* – то же для керна EDC; *в* – временное запаздывание отфильтрованных рядов *V* керна EDC (*b*) относительно таких же рядов керна Востока (*a*), определенное методом SWT (кривая) и методом совмещения экстремумов (ромбики). Пустые ромбики соответствуют случаям, когда определение экстремумов хотя бы в одном из рядов затруднено. Порядковые номера экстремумов показаны на верхней панели; *г* – отфильтрованные ряды газосодержания кернов Востока (1) и EDC (2), построенные с использованием согласованных орбитальных датировок этих кернов, и перевернутый отфильтрованный ряд ISI380 (3). Серые вертикальные полосы обозначают временные интервалы с пониженной амплитудой вариаций местной инсоляции

Fig. 2. Constructing coherent *V*-based orbital timescales for Vostok and EDC ice cores: *a* – normalized experimental (dots) and filtered (curve) air content records from the Vostok ice core on the individual *V*-based timescale; *b* – same as above for the EDC ice core; *в* – time delay between filtered EDC (*b*) and Vostok (*a*) *V* records obtained with SWT method (curve) and using peak-to-peak matching (diamonds). The top panel has the sequential numbers of the extrema. Empty diamonds show the tie points for which correspondence between the extrema is questionable due to data scattering; *г* – filtered Vostok (1) and EDC (2) records plotted on the joint *V*-based orbital timescales and filtered (and inverted) insolation curve ISI380 (3). The vertical gray strips indicate time intervals with smoothed variations of local insolation

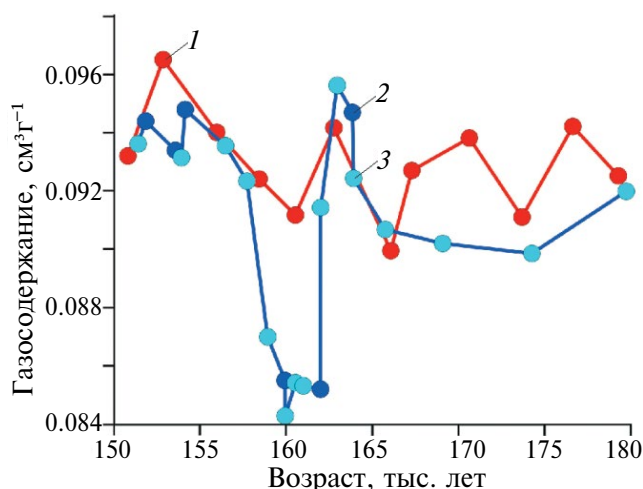


Рис. 3. Пример высокоамплитудных «неорбитальных» вариаций газосодержания льда (*V*) в ледяном керне со станции Восток: 1 – керн EDC (барометрический метод измерения *V*); 2 – керн из скважин 3Г и 4Г на станции Восток (волюметрический метод); 3 – керн из скважины 5Г на станции Восток (барометрический метод)

Fig. 3. High-amplitude “non-orbital” variations of air content *V* in the Vostok ice core: 1 – EDC ice core (barometric *V* measurements); 2 – Vostok 3G and 4G ice cores (volumetric *V* measurements); 3 – Vostok 5G ice core (barometric *V* measurements)

свидетельствует о естественной природе низких значений газосодержания льда, которые наблюдаются в керне Востока, но не зафиксированы в керне EDC.

Исследуя полученные ряды, мы не обнаружили высокоамплитудные среднепериодические (с периодами порядка 10^2 – 10^3 лет) неорбитальные вариации газосодержания льда, которые были бы синхронными в обоих изученных кернах.

Это свидетельствует о том, что изменения интенсивности ветра, с которыми мы ассоциируем такие вариации, имели локальный характер и отражали местные изменения погодных условий в связи с происходившими в прошлом перестройками атмосферной циркуляции в Антарктике.

Суммарный вклад климатически обусловленных изменений температур T_c , T_s и давления P_c (см. уравнения 1 и 2) в общую изменчивость газосодержания *V* ледяных кернов Востока и EDC оценивается в среднем в 13% (Raynaud et al., 2007; Lipenkov et al., 2011). Остальные 87% изменчивости экспериментального рядов *V* связаны с независимыми от T_s изменениями пористости ледяной породы в момент изоляции фирновых пор (V_c), а также с погрешностями измерений. Рассматривая отфильтрованный ряд *V* в качестве компоненты экспериментального ряда, связанной только с инсоляцией, мы с помощью линейно-регрессионного анализа определили, что «инсоляционная доля» в общей изменчивости газосодержания составляет в среднем 44%, а оставшиеся 43% приходятся на «неорбитальные» вариации V_c (~30%) и погрешности измерений (~13%). При этом на отрезках времени с сильным инсоляционным сигналом его доля в общей изменчивости *V* возрастает до 53%, а на отрезках с пониженной амплитудой вариаций ISI (серые зоны на рис. 2) падает до 25%. Таким образом, нет ничего удивительного в том, что именно на этих временных отрезках метод совмещения экстремумов малопригоден для орбитального тюнинга рядов газосодержания льда (см. рис. 2, *в*).

Отметим, что метод экстремумов нацелен на получение дискретных датировок льда для настройки гляциологической модели, с помощью которой затем производится интерполяция возраста льда между контрольными точками (Kawamura et al., 2007). Он дает хорошие результаты только тогда, когда в рядах доминирует инсоляционный сигнал,

а «неорбитальная» составляющая изменчивости измеряемой характеристики льда незначительна. Этим условиям в большей мере соответствуют ряды $\delta O_2/N_2$, при построении которых принято отбраковывать «аномальные» результаты измерений (Kawamura et al., 2007; Landais et al., 2012).

Метод CWT дает мгновенное запаздывание одного ряда относительно другого, не обращая внимание на особую значимость пиков для визуального восприятия степени совмещения кривых. Поэтому совмещение пиков при использовании CWT получается не таким идеальным, как в методе экстремумов. Однако, учитывая указанные

выше неопределённости в датировке самих экстремумов в рядах газосодержания с повышенным «неорбитальным» шумом, использование метода CWT для таких рядов следует считать более предпочтительным.

Рассчитанное с помощью CWT временное запаздывание ряда EDC относительно ряда Восток (см. рис. 2, в) было использовано для построения взаимно согласованных временных шкал рассматриваемых кернов. С этой целью к возрасту керна EDC по индивидуальной орбитальной шкале прибавлялась, а от возраста керна Востока отнималась $\frac{1}{2}$ величины текущего запаздывания.

Таблица. Взаимно согласованные орбитальные шкалы возраста ледяных кернов со станций Восток и Конкордия (EDC)

Table. Joint *V*-based orbital timescales for Vostok and EDC ice cores

Номер экстремума	Возраст экстремума по ISI380, тыс. лет	Глубина по керну Востока, м	Глубина по керну EDC, м	Абсолютное расхождение датировок, тыс. лет
2	164.9	2174.7	1913.6	0.53
3	177.1	2298.3	1967.9	0.08
4	185.3	2364.0	2002.7	0.14
5	196.7	2449.1	2056.0	0.22
6	209.9	2560.0	2128.2	0.02
7	222.6	2657.9	2200.2	0.29
8	230.5	2697.7	2229.2	0.35
9	239.0	2736.4	2263.2	0.21
10	252.6	2801.9	2328.6	0.15
11	268.6	2859.2	2379.3	0.33
12	282.4	2907.5	2418.2	0.58
13	290.1	2940.7	2444.6	0.60
14	300.5	2979.9	2475.5	0.50
15	313.3	3024.7	2508.8	0.34
16	326.5	3072.3	2549.3	0.34
17	336.1	3113.2	2587.5	0.39
18	340.3	3131.8	2598.7	0.38
19	353.7	3167.1	2621.5	0.18
20	370.4	3204.0	2648.2	0.05
21	385.7	3236.0	2674.7	0.25

Примечание. В таблице приведены глубины ледяных кернов, на которых возраст льда, по согласованным орбитальным датировкам, равен возрасту экстремумов на инсоляционной кривой ISI 380. Порядковые номера экстремумов как на рис. 2, а. В крайнем правом столбце указано абсолютное расхождение между индивидуальной и согласованной орбитальными датировками кернов.

Comments. The ages in the second column refer to both the age of the ISI380 extremum (in the first column) and the coherent *V*-based orbital age of ice at the depths in the Vostok and EDC cores that are shown in the third and fourth columns, respectively. The sequential numbers of the extrema as in fig. 2, a. The rightmost column gives the absolute deviation of the individual *V*-based age from the coherent age.

Полученные таким образом «осреднённые» временные шкалы улучшили синхронизацию отфильтрованных рядов V как между собой, так и с кривой ISI (см. рис. 2, z).

В таблице приведены глубины ледяных кернов Востока и EDC, на которых возраст льда, по согласованной орбитальной датировке, равен возрасту экстремумов на инсоляционной кривой ISI380. Среднее абсолютное отклонение индивидуальных орбитальных датировок от взаимно согласованных составило 0.3 ± 0.2 (σ) тыс. лет, что свидетельствует о высокой воспроизводимости результатов орбитального датирования ледяных кернов, полученных на близких широтах, при использовании метода CWT.

Выше отмечалось, что важным моментом при построении орбитальной временной шкалы керна является выбор инсоляционной кривой. В нашем исследовании вслед за работой (Raynaud et al., 2007) в качестве инсоляционного показателя используется ISI со специфическим для данного ряда V пороговым значением среднесуточной инсоляции $w_{кр.}$ (см. выше). В более поздней работе (Raynaud et al., 2024) для этой цели было предложено использовать среднюю за астрономическое летнее полугодие местную инсоляцию. Средняя летняя инсоляция, так же как и ISI, хорошо коррелирует с газосодержанием льда, но в отличие от ISI, рассчитывается независимо от ряда V . Сравнение ISI380 со средней летней инсоляцией, рассчитанной для пункта бурения керна EDC (см. рис. 4 в работе (Raynaud et al., 2024)), показало, что фазовый сдвиг между отфильтрованными рядами этих характеристик в среднем составляет 0.26 тыс. лет и не превышает 0.65 тыс. лет. Полученные величины сопоставимы с фазовыми сдвигами кривых ISI, рассчитанных с разными пороговыми значениями $w_{кр.}$ (Lipenkov et al., 2011), и достаточно точно характеризуют вклад неопределенностей, обусловленных выбором той или иной инсоляционной кривой, в общую погрешность датирования льда по его газосодержанию.

Экспериментально оценить общую абсолютную погрешность разработанных нами орбитальных датировок можно сравнив их с оптимизированными временными шкалами AICC2012 и AICC2023, первая из которых считалась эталонной для кернов Востока и EDC в 2012–2023 годах, а вторая является таковой в настоящее время. Графики, представленные на рис. 4, показывают, что отклонение наших датировок от эталонных в большинстве случаев не превышает 2 тыс. лет, т.е. не выходит за пределы общей стандартной погрешности метода орбитального датирования керна по рядам газосодержания льда (Скакун, Липенков, 2016) и, в основном, находится в пределах стандартных погрешностей самих референтных шкал AICC2012 (1.9–4.8 тыс. лет) и AICC2023 (0.8–2.6 тыс. лет).

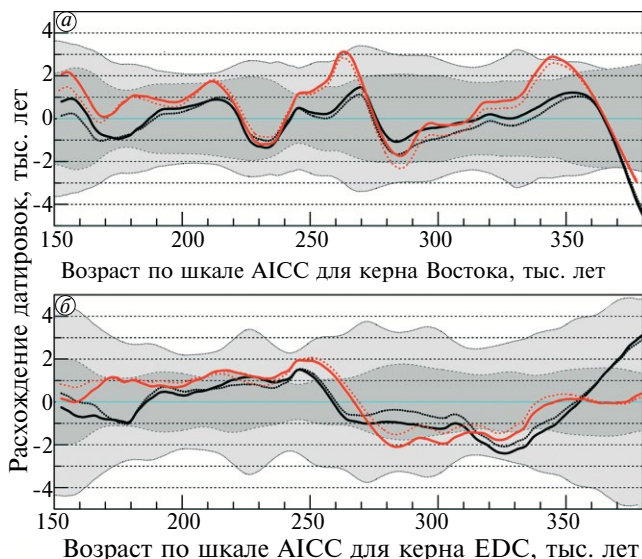


Рис. 4. Отклонение орбитальных датировок, полученных по газосодержанию льда для кернов Востока (а) и EDC (б), от оптимизированных временных шкал этих кернов AICC2012 и AICC2023. Чёрными кривыми показаны отклонения индивидуальных (точечная линия) и взаимно согласованных (сплошная линия) орбитальных датировок от временной шкалы AICC2012, красными кривыми — отклонения этих датировок от временной шкалы AICC2023. Возраст по оси абсцисс соответствует той шкале AICC, относительно которой показаны отклонения орбитальных датировок. Светло-серой заливкой обозначена область стандартной погрешности шкалы AICC2012, темно-серой — область стандартной ошибки AICC2023

Fig. 4. Deviation of the V -based orbital timescales obtained for the Vostok (a) and EDC (b) ice cores from their AICC2012 and AICC2023 chronologies. Black curves — deviations of the individual (dotted line) and coherent (solid line) orbital timescales from the AICC2012 chronology, red curves — deviations of these timescales from the AICC2023 chronology. The age on the X-axis corresponds to the AICC timescale against which the deviation of the orbital dating is shown. The light-gray fill shows the standard error of the AICC2012 chronology, the dark-gray fill shows the standard error of the AICC2023

(Наблюдаемый рост расхождения датировок в правой части графика на рис. 4, а связан с влиянием краевого эффекта на расчёт временного запаздывания методом CWT ряда газосодержания льда станции Восток, который, в отличие от ряда EDC, ограничен справа возрастом 390 тыс. лет.)

Таким образом, проведённое нами исследование продемонстрировало высокую воспроизводимость метода орбитального датирования льда по данным о его газосодержании и подтвердило ранее сделанную оценку общей стандартной погрешности этого метода.

В заключение отметим, что отклонение индивидуальных орбитальных датировок, установленных по газосодержанию льда для кернов Востока и EDC, от взаимно согласованных датировок для этих кернов имеет тот же порядок величины, что и расхождение двух независимых орбитальных датировок, полученных для керна станции Восток по экспериментальным рядам газосодержания льда и соотношения O_2/N_2 в экстрагированном из льда воздухе (Lipenkov et al., 2011). В связи с этим представляется весьма перспективным объединение «мульти-кернового» (эта работа) и двухпараметрического (Lipenkov et al., 2011) подходов к орбитальному датированию уже имеющихся (Восток, EDC, Купол Фуджи) и будущих кернов Центральной Антарктиды путем одновременного использования экспериментальных рядов V и $\delta O_2/N_2$, полученных по нескольким пробуренным в этом районе глубоким скважинам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа рядов газосодержания льда, полученных равноточными измерениями образцов ледяных кернов со станций Восток и Конкордия (EDC), мы оценили вклад различных составляющих в общую изменчивость общего содержания воздуха во льду Центральной Антарктиды. Было установлено, что около 74% изменчивости этой характеристики льда связаны с независимыми от среднегодовой температуры поверхности ледника изменениями пористости ледяной породы на границе фирн-лед в момент изоляции фирновых пор от атмосферы. Эта составляющая общей изменчивости газосодержания, в свою очередь, состоит из сигнала местной летней инсоляции (~44%) и «неорбитальных» вариаций пористости, обусловленных изменениями погодных условий во время отложения снега (~30%).

Ранее было предложено использовать инсоляционный сигнал в экспериментальных рядах газосодержания льда для датирования ледяных кернов методом орбитальной настройки (Raynaud et al., 2007; Lipenkov et al., 2011). Чтобы точнее оценить неопределенности, связанные с этим методом датирования, мы сравнили индивидуальные орбитальные временные шкалы, полученные для кернов Востока и EDC, полагая, что связанные с местной инсоляцией изменения газосодержания льда должны быть одинаковы и происходить синхронно в пунктах бурения, расположенных на примерно одинаковой широте.

Проведенное исследование показало, что метод непрерывного вейвлет-преобразования (CWT) — надежный инструмент орбитальной настройки отфильтрованных рядов газосодержания льда, которая заключается в совмещении их с расчетными кривыми местной летней инсоляции (ISI).

Несмотря на значительный вклад «неорбитальных» вариаций в общую изменчивость экспериментальных рядов газосодержания, использование метода CWT обеспечило хорошую синхронизацию временных шкал Востока и EDC и позволило построить взаимно согласованные орбитальные датировки для этих кернов, основанные на данных об их газосодержании. Среднее абсолютное отклонение индивидуальных орбитальных датировок от взаимно согласованных составило 0.3 ± 0.2 тыс. лет, что свидетельствует о хорошей воспроизводимости разрабатываемого метода орбитального датирования.

Сравнение полученных нами датировок с оптимизированными временными шкалами AICC2012 и AICC2023 для кернов Востока и EDC показало, что их расхождение в большинстве случаев не превышает 2 тыс. лет, т.е. не выходит за пределы общей стандартной погрешности метода датирования по рядам газосодержания льда (Скакун, Липенков, 2016) и, в целом, находится в пределах стандартных погрешностей самих референтных шкал AICC2012 (1.9–4.8 тыс. лет) и AICC2023 (0.8–2.6 тыс. лет).

Показано, что увеличение погрешности орбитального датирования на отдельных участках временной шкалы может быть связано с естественным ослаблением инсоляционного сигнала. Уменьшение амплитуды вариаций ISI приводит к увеличению относительного вклада «неорбитальных» вариаций в общую изменчивость газосодержания. Мы не обнаружили высокоамплитудных среднепериодических (с периодами порядка 10^2 – 10^3 лет) «неорбитальных» вариаций газосодержания льда, которые были бы синхронными в обоих исследованных кернах. С другой стороны, некоторые из подобных вариаций хорошо воспроизводятся измерениями в параллельных ледяных кернах, пробуренных на расстоянии нескольких десятков метров друг от друга, что подтверждает их значимость и связь с локальными изменениями условий формирования льда.

На основании проведенного исследования сделан вывод о перспективности объединения «мульти-кернового» и двухпараметрического (общее газосодержание льда и $\delta O_2/N_2$) подходов для орбитального датирования уже полученных (Восток, EDC, Купол Фуджи) и будущих кернов Центральной Антарктиды, включая керны более древнего антарктического льда.

Благодарности. Авторы благодарят Мари-Франс Лутр за помощь в разработке программного обеспечения для реализации метода CWT. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант 23-27-00447.

Acknowledgements. The authors would like to thank Marie-France Loutre for her help in developing the

software to implement the CWT method. The work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation, grant 23-27-00447.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Скакун А.А., Липенков В.Я. Исследование погрешностей орбитального метода датирования льда по данным о его газосодержании на примере ледяного керна со станции Купол Фуджи (Антарктида) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. Вып. 2 (110). С. 14–29.
- Bazin L., Landais A., Lemieux-Dudon B., Toyé Mahamadou Kele H., Veres D., Parrenin F., Martinerie P., Ritz C., Capron E., Lipenkov V., Loutre M.-F., Raynaud D., Vinther B., Svensson A., Rasmussen S.O., Severi M., Blunier T., Leuenberger M., Fischer H., Masson-Delmotte V., Chappellaz J., Wolff E. An optimized multi-proxy, multi-site Antarctic ice and gas orbital chronology (AICC2012) 120–800 ka // *Climate Past*. 2013. V. 9. P. 1715–1731. <https://doi.org/10.5194/cp-9-1715-2013>
- Bender M. Orbital tuning chronology for the Vostok climate record supported by trapped gas composition // *Earth and Planetary Science Letters*. 2002. V. 204. P. 275–289.
- Bouchet M., Landais A., Grisart A., Parrenin F., Prié F., Jacob R., Fourré E., Capron E., Raynaud D., Lipenkov V.Y., Loutre M.-F., Extier T., Svensson A., Legrain E., Martinerie P., Leuenberger M., Jiang W., Ritterbusch F., Lu Z.-T., Yang G.-M. The Antarctic Ice Core Chronology 2023 (AICC2023) chronological framework and associated timescale for the European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA) Dome C ice core // *Climate Past*. 2023. V. 19. P. 2257–2286. <https://doi.org/10.5194/cp-19-2257-2023>
- EPICA Community Members. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core // *Nature*. 2004. V. 429. P. 623–628.
- Huybers P. Early Pleistocene glacial cycles and the integrated summer insolation forcing // *Science*. 2006. V. 313 (5786). P. 508–511. <https://doi.org/10.1126/science.1125249>
- Kawamura K., Parrenin F., Lisiecki L., Uemura R., Vimieux F., Severinghaus J.P., Hutterli M.A., Nakazawa T., Aoki S., Jouzel J., Raymo M.E., Matsumoto K., Nakata H., Motoyama H., Fujita S., Goto-Azuma K., Fujii Y., Watanabe O. Northern Hemisphere forcing of climatic cycles in Antarctica over the past 360 000 years // *Nature*. 2007. V. 448. P. 912–916.
- Landais A., Dreyfus G., Capron E., Pol K., Loutre M.-F., Raynaud D., Lipenkov V.Y., Arnaud L., Masson-Delmotte V., Paillard D., Jouzel J., Leuenberger M. Towards orbital dating of the EPICA Dome C ice core using O_2/N_2 // *Climate Past*. 2012. V. 8. P. 191–203. <https://doi.org/10.5194/cp-8-191-2012>
- Laskar J., Robutel P., Joutel F., Gastineau M., Correia A.C.M., Levrard B. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth // *Astronomy and Astrophysics*. 2004. V. 428. P. 261–285. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041335>
- Lemieux-Dudon B., Blayo E., Petit J.R., Waelbroeck C., Svensson A., Ritz C., Barnola J.M., Narcisi B.M., Parrenin F. Consistent dating for Antarctic and Greenland ice cores // *Quaternary Science Reviews*. 2010. V. 29. P. 8–20. <https://doi.org/10.1016/J.QUASCIREV.2009.11.010>
- Lipenkov V., Candaudap F., Ravoire J., Dulac E., Raynaud D. A new device for air content measurements in polar ice // *Journ. of Glaciology*. 1995. V. 41 (138). P. 423–429.
- Lipenkov V.Ya., Raynaud D., Loutre M.F., Duval P. On the potential of coupling air content and O_2/N_2 from trapped air for establishing an ice core chronology tuned on local insolation // *Quaternary Science Reviews*. 2011. V. 30. P. 3280–3289. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.07.013>
- Martinerie P., Raynaud D., Etheridge D.M., Barnola J.-M., Mazaudier D. Physical and climatic parameters which influence the air content in polar ice // *Earth and Planetary Science Letters*. 1992. V. 112. P. 1–13.
- Martinerie P., Lipenkov V.Ya., Raynaud D., Chappellaz J., Barkov N.I., Lorius C. Air content paleo record in the Vostok ice core (Antarctica). A mixed record of climatic and glaciological parameters // *Journ. of Geophysical Research*. 1994. V. 99 (D5). P. 10565–10576.
- Martinerie P., Lipenkov V., Raynaud D. Correction of the air content measurements in polar ice for the effect of cut bubbles at the surface of the sample // *Journ. of Glaciology*. 2007. V. 36 (124). P. 299–303.
- Mélice J.L., Servain J. The tropical Atlantic meridional SST gradient index and its relationship with the SOI, NAO and Southern Ocean // *Journ. of Climate Dynamics*. 2003. V. 20 (5). P. 447–464. <https://doi.org/10.1007/s00382-002-0289-x>
- Parrenin F., Barnola J.-M., Beer J., Blunier T., Castellano E., Chappellaz J., Dreyfus G., Fischer H., Fujita S., Jouzel J., Kawamura K., Lemieux-Dudon B., Loulergue I.L., Masson-Delmotte V., Narcisi B., Petit J.-R., Raisbeck G., Raynaud D., Ruth U., Schwander J., Severi M., Spahni R., Steffensen J.P., Svensson A., Udisti R., Waelbroeck C., Wolff E. The EDC3 chronology for the EPICA Dome C ice core // *Climate Past*. 2007. V. 3. P. 485–497.
- Parrenin F., Bazin L., Buizert C., Capron E., Chowdry Beeman J., Corrick E., Drysdale R., Kawamura K., Landais A., Mulvaney R., Oyabu I., Rasmussen S. The Paleochrono probabilistic model to derive a consistent chronology for several paleoclimatic sites // *EGU sphere*. 2021. P. 21–822. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-822>
- Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delague G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Ya., Lorius C., Pepin 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 (6735). P. 429–436.
- Raynaud D., Lipenkov V.Ya., Lemieux-Dudon B., Duval P., Loutre M.-F., Lhomme N. The local insolation signature of air content in Antarctic ice. A new step toward an absolute dating of ice records // *Earth and Planetary Science Letters*. 2007. V. 26. P. 337–349.
- Raynaud D., Yin Q., Capron E., Wu Z., Parrenin F., Berger A., Lipenkov V. Local summer temperature changes over the past 440 ka revealed by the total air content in the Antarctic EPICA Dome C ice core // *Climate Past*. 2024. V. 20. P. 1269–1282.
<https://doi.org/10.5194/cp-20-1269-2024>
- Salamatina A.N., Tsyganova E.A., Popov S.V., Lipenkov V.Ya. Ice flow line modeling in ice core data interpretation. Vostok Station (East Antarctica) // *Physics of ice core records*. 2009. V. 2. P. 167–194.
- Veres D., Bazin L., Landais A., Toyé Mahamadou Kele H., Lemieux-Dudon B., Parrenin F., Martinerie P., Blayo E., Blunier T., Capron E., Chappellaz J., Rasmussen S., Severi M., Svensson A., Vinther B., Wolff E. The Antarctic ice core chronology (AICC2012): an optimized multi-parameter and multi-site dating approach for the last 120 thousand years // *Climate Past*. 2013. V. 9. P. 1733–1748.
<https://doi.org/10.5194/cp-9-1733-2013>

Citation: Khomyakova V.A., Tebenkova N.A., Lipenkov V.Ya., Raynaud D. Consistency of the orbital chronologies derived for Vostok and EPICA DC ice cores based on the dependence of ice air content on local insolation. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2025, 65 (1): 7–20. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673425010017

Consistency of the orbital chronologies derived for Vostok and EPICA DC ice cores based on the dependence of ice air content on local insolation

© 2025 V.A. Khomyakova^a, N.A. Tebenkova^{a,b}, V.Ya. Lipenkov^{a,#}, D. Raynaud^c

^aArctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia

^bInstitute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

^cInstitute of Environmental Geosciences, Grenoble, France

[#]e-mail: lipenkov@aari.ru

Received December 2, 2024; revised December 9, 2024; accepted December 25, 2024

Total air content (TAC) is a multi-proxy property of polar ice, which is thought to contain evidence of past changes in local insolation, summer temperature, meteorological conditions, and the elevation of glaciers at the site of ice formation. By revisiting two equally accurate TAC records obtained at the Vostok and EPICA DC drilling sites, we attempt a careful assessment of the contributions of different natural components (orbital and non-orbital, global and local), and of experimental uncertainties to the total variance of the TAC data. We show that a major contribution (~74 % of the total variance) is made by the non-thermal variations of the close-off porosity, which includes the local insolation signal (~44 %) and the non-orbital variations of the firn properties related to changes in weather conditions (~30 %). The insolation signal has been used to produce TAC-based timescales for the EPICA DC and Vostok ice cores (Raynaud et al., 2007; Lipenkov et al., 2011). In this paper, in order to better estimate the uncertainties of this dating technique, we compare the individual TAC timescales obtained for the two ice cores in their overlap age interval (150–390 ka) assuming that the insolation-related variations should be the same and synchronous at the two sites, which sit at similar latitudes. We prove that CWT analysis is the most reliable technique for tuning the experimental TAC records to their local summer insolation targets (ISI). It provides excellent reproducibility of the deduced TAC timescales (0.3 ± 0.2 ka) and good synchronization of the records obtained from the different ice cores even though the scattering of the TAC data is large. Finally, using the same CWT technique we come to the construction of the coherent TAC-based orbital timescales for Vostok and EDC ice cores. Comparison of the TAC timescales with the optimized chronologies AICC2012 and AICC2023 for the Vostok and EDC cores showed that their discrepancy, as a rule, does not exceed 2 ka, which is consistent with both the standard error of the TAC-based dating method (± 2.1 ka) and the standard errors of the AICC2012 ($\pm 1.9 \dots 4.8$ ka) and AICC2023 ($\pm 0.8 \dots 2.6$ ka) reference chronologies themselves. We show that the increase in the uncertainty of orbital dating can be related to the natural weakening of variations of local insolation in some periods of time. The decrease in amplitude of the ISI variations implies reduction

of the insolation signal and increase of the noise/signal ratio in the air content record. We did not find high-amplitude short-term (millennial scale) non-orbital TAC variations that were synchronous in both the ice cores that were studied. On the other hand, some of these variations are well reproduced by measurements in the replicate ice cores drilled several tens of metres apart, which confirms their significance and link with changes in the local conditions of ice formation. Based on our study, we argue that applying a multi-core and dual-proxy (TAC and O_2/N_2) approach would be advantageous for comprehensive investigation of the uncertainties associated with the combined use of TAC and O_2/N_2 records for orbital dating of existing (Vostok, EDC, Dome Fuji) and future ice cores, including those which will be drilled in central Antarctica as part of the Oldest Ice projects.

Keywords: air content, local summer insolation, orbital tuning, ice core timescale

REFERENCES

- Skakun A.A., Lipenkov V.Ya. Assessing the uncertainties of an ice core time scale based on orbital tuning of air content records: a case study of the Dome Fuji (Antarctica) ice core. *Problems of Arctica and Antarctica*. 2016, 4 (110): 14–29 [In Russian].
- Bazin L., Landais A., Lemieux-Dudon B., Toyé Mahamadou Kele H., Veres D., Parrenin F., Martinerie P., Ritz C., Capron E., Lipenkov V., Loutre M.-F., Raynaud D., Vinther B., Svensson A., Rasmussen S.O., Severi M., Blunier T., Leuenberger M., Fischer H., Masson-Delmotte V., Chappellaz J., Wolff E. An optimized multi-proxy, multi-site Antarctic ice and gas orbital chronology (AICC2012): 120–800 ka, *Climate Past*. 2013, 9: 1715–1731. <https://doi.org/10.5194/cp-9-1715-2013>
- Bender M. Orbital tuning chronology for the Vostok climate record supported by trapped gas composition. *Earth and Planetary Science Letters*. 2002, 204: 275–289.
- Bouchet M., Landais A., Grisart A., Parrenin F., Prié F., Jacob R., Fourré E., Capron E., Raynaud D., Lipenkov V.Y., Loutre M.-F., Extier T., Svensson A., Legrain E., Martinerie P., Leuenberger M., Jiang W., Ritterbusch F., Lu Z.-T., and Yang G.-M. The Antarctic Ice Core Chronology 2023 (AICC2023) chronological framework and associated timescale for the European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA) Dome C ice core, *Climate Past*. 2023, 19: 2257–2286. <https://doi.org/10.5194/cp-19-2257-2023>
- EPICA community members. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*. 2004, 429: 623–628.
- Huybers P. Early Pleistocene glacial cycles and the integrated summer insolation forcing. *Science*. 2006, 313 (5786): 508–511. <https://doi.org/10.1126/science.1125249>
- Kawamura K., Parrenin F., Lisiecki L., Uemura R., Vimieux F., Severinghaus J.P., Hutterli M.A., Nakazawa T., Aoki S., Jouzel J., Raymo M.E., Matsumoto K., Nakata H., Motoyama H., Fujita S., Goto-Azuma K., Fujii Y., Watanabe O. Northern Hemisphere forcing of climatic cycles in Antarctica over the past 360 000 years. *Nature*. 2007, 448: 912–916.
- Landais A., Dreyfus G., Capron E., Pol K., Loutre M.-F., Raynaud D., Lipenkov V.Y., Arnaud L., Masson-Delmotte V., Paillard D., Jouzel J., Leuenberger M. Towards orbital dating of the EPICA Dome C ice core using O_2/N_2 *Climate Past*. 2012, 8: 191–203. <https://doi.org/10.5194/cp-8-191-2012>
- Laskar J., Robutel P., Joutel F., Gastineau M., Correia A.C.M., Levrard B. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy and Astrophysics*. 2004, 428: 261–285. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041335>
- Lemieux-Dudon B., Blayo E., Petit J.R., Waelbroeck C., Svensson A., Ritz C., Barnola J.M., Narcisi B.M., Parrenin F. Consistent dating for Antarctic and Greenland ice cores, *Quaternary Science Reviews*. 2010, 29: 8–20. <https://doi.org/10.1016/J.QUASCIREV.2009.11.010>
- Lipenkov V., Candaudap F., Ravoire J., Dulac E., Raynaud D. A new device for air content measurements in polar ice. *Journ. of Glaciology*. 1995, 41 (138): 423–429.
- Lipenkov V.Ya., Raynaud D., Loutre M.F., Duval P. On the potential of coupling air content and O_2/N_2 from trapped air for establishing an ice core chronology tuned on local insolation. *Quaternary Science Reviews*. 2011, 30: 3280–3289. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.07.013>
- Martinerie P., Raynaud D., Etheridge D.M., Barnola J.-M., Mazaudier D. Physical and climatic parameters which influence the air content in polar ice. *Earth and Planetary Science Letters*. 1992, 112: 1–13.
- Martinerie P., Lipenkov V.Ya., Raynaud D., Chappellaz J., Barkov N.I., Lorius C. Air content paleo record in the Vostok ice core (Antarctica): A mixed record of climatic and glaciological parameters. *Journal of Geophysical Research*. 1994, 99 (D5): 10565–10576.
- Martinerie P., Lipenkov V., Raynaud D. Correction of the air content measurements in polar ice for the effect of cut bubbles at the surface of the sample. *Journ. of Glaciology*. 2007, 36 (124): 299–303.
- Mélice, J.L., Servain J. The tropical Atlantic meridional SST gradient index and its relationship with the SOI, NAO and Southern Ocean. *Journ. of Climate Dynamics*. 2003, 20 (5): 447–464. <https://doi.org/10.1007/s00382-002-0289-x>

- Parrenin F., Barnola J.-M., Beer J., Blunier T., Castellano E., Chappellaz J., Dreyfus G., Fischer H., Fujita S., Jouzel J., Kawamura K., Lemieux-Dudon B., Loulergue L., Masson-Delmotte V., Narcisi B., Petit J.-R., Raisbeck G., Raynaud D., Ruth U., Schwander J., Severi M., Spahni R., Steffensen J.P., Svensson A., Udisti R., Waelbroeck C., Wolff E. The EDC3 chronology for the EPICA Dome C ice core. *Climate Past*. 2007, 3: 485–497.
- Parrenin F., Bazin L., Buizert C., Capron E., Chowdry Beeman J., Corrick E., Drysdale R., Kawamura K., Landais A., Mulvaney R., Oyabu I., Rasmussen S. The Paleochrono probabilistic model to derive a consistent chronology for several paleoclimatic sites. *EGUsphere*, 2021: 21–822. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-822>
- Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delague G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Ya., Lorius C., Pepin 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 (6735): 429–436.
- Raynaud D., Lipenkov V.Ya., Lemieux-Dudon B., Duval P., Loutre M.-F., Lhomme N. The local insolation signature of air content in Antarctic ice. A new step toward an absolute dating of ice records. *Earth and Planetary Science Letters*. 2007, 26: 337–349.
- Raynaud D., Yin Q., Capron E., Wu Z., Parrenin F., Berger A., Lipenkov V. Local summer temperature changes over the past 440 ka revealed by the total air content in the Antarctic EPICA Dome C ice core, *Climate Past*. 2024, 20: 1269–1282. <https://doi.org/10.5194/cp-20-1269-2024>
- Salamatina A.N., Tsyganova E.A., Popov S.V., Lipenkov V.Ya. Ice flow line modeling in ice core data interpretation: Vostok Station (East Antarctica). In: Ed. T. Hondoh. *Physics of ice core records V. 2*. Sapporo: Hokkaido University Press, 2009, 2: 167–194.
- Veres D., Bazin L., Landais A., Toyé Mahamadou Kele H., Lemieux-Dudon B., Parrenin F., Martinerie P., Blayo E., Blunier T., Capron E., Chappellaz J., Rasmussen S., Severi M., Svensson A., Vinther B., and Wolff E. The Antarctic ice core chronology (AICC2012): an optimized multi-parameter and multi-site dating approach for the last 120 thousand years, *Climate Past*. 2013, 9: 1733–1748. <https://doi.org/10.5194/cp-9-1733-2013>.