

# Ледники и ледниковые покровы

УДК 551.583.2

## Изменения климата в индоокеанском секторе Восточной Антарктиды за последние 350 лет

© 2015 г. Д.О. Владимирова<sup>1,2</sup>, А.А. Екайкин<sup>1,2</sup>, В.Я. Липенков<sup>1</sup><sup>1</sup>Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург;<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет

vladimirova@aari.ru

## The variability of climate in Indian Ocean sector of East Antarctica over the past 350 years

D.O. Vladimirova<sup>1,2</sup>, A.A. Ekaykin<sup>1,2</sup>, V.Ya. Lipenkov<sup>1</sup><sup>1</sup>Arctic and Antarctica Research Institute, St.Petersburg; <sup>2</sup>Saint-Petersburg State University

Статья принята к печати 21 августа 2015 г.

*Антарктида, изотопный состав, ледяные керны, палеоклимат, скорость снегонакопления.**Antarctica, ice cores, isotopic composition, paleoclimate, snow accumulation rate.*

По данным об изотопном составе ледяных кернов, полученных из скважин, пробуренных в индоокеанском секторе Восточной Антарктиды между трассами Мирный – Восток и Прогресс – Восток, восстановлено изменение температуры воздуха и скорости снегонакопления за последние 350 лет. Проанализирована связь временной изменчивости изотопного состава осадков с местной приземной температурой воздуха и температурой в источнике влаги. Обнаружено проявление малого ледникового периода, а также так называемого климатического сдвига 1970-х годов в исследуемом секторе Антарктиды. Обсуждается роль неклиматических факторов, влияющих на формирование долгопериодных трендов в рядах изотопного состава осадков, получаемых по ледяным кернам.

The temperature and snow accumulation rate anomaly over the past 350 years have been reconstructed based on isotopic composition of shallow ice cores and snow pits samples as well as glaciological observations in pits and at stake farms located in Indian Ocean sector of East Antarctica. The relationship of temporal variability of isotopic composition of precipitation and surface air temperature in ensemble with sea surface temperature has been analyzed. The fingerprints of Little Ice Age and climatic shift 1970s have been defined. We have also figured out the influence of non-climatic drivers on the formation of signal in stable water isotopic series.

### Введение

В условиях современной индустриальной эпохи, когда содержание парниковых газов в атмосфере Земли превысило максимальные уровни, наблюдавшиеся, по крайней мере, за последние 800 тыс. лет [8, 13], вопрос о дальнейших ответных изменениях температуры планеты остаётся открытым. Климатические модели должны подвергаться тестированию с использованием новых данных для более точной оценки изменений климата в ближайшем будущем. В связи с этим необходимо понимание изменений, прежде всего температуры воздуха и атмосферной циркуляции, в масштабе нескольких сотен лет для детального сравнения доиндустриальной изменчивости климата на нашей планете с таковой в современную эпоху. Текущие прояв-

ления климатических изменений в Антарктиде, не подверженной непосредственному влиянию антропогенной деятельности, могут дать информацию об изменчивости климатических элементов: температуры воздуха (по данным изотопного состава осадков), количества осадков и баланса массы ледникового щита (по данным о снегонакоплении) [15, 18, 19].

Выбранный район исследования Восточной Антарктиды расположен между станциями Прогресс, Восток и Мирный и представляет собой «белое пятно» в отношении региональных палеоклиматических реконструкций, хотя и относится к области, в которой традиционно работает Российская антарктическая экспедиция. С начала исследования этого региона (1956 г.) накоплен большой объём метеорологических и гляциологических данных, требующих обобщения с

целью понимания временной изменчивости гляциоклиматических характеристик как в индоокеанском секторе, так и в Антарктиде в целом.

В настоящей работе мы рассматриваем данные об изотопном составе образцов снега и неглубоких фирново-ледяных кернов с привлечением данных многолетних метеорологических и гляциологических наблюдений с целью восстановления изменчивости климатических характеристик в индоокеанском секторе Восточной Антарктиды за последние сотни лет и связи с изменчивостью климата Южного полушария.

### Методика и данные

**Методика измерения изотопного состава в ЛИКОС ААНИИ** (Лаборатория изменений климата и окружающей среды ФГБУ «Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт»). В основе связи изотопного состава атмосферных осадков с температурой их формирования лежит явление так называемого изотопного истощения влаги в воздушной массе, несущей осадки. Изотопное истощение обусловлено фракционированием (т.е. разделением по массе) изотопов при фазовых переходах. Под изотопным составом или концентрацией изотопов имеется в виду относительная концентрация  $\delta$ , а именно – разность отношений количества тяжёлых и лёгких изотопов в образце и стандарте (SMOW – standard mean ocean water) относительно этого соотношения для стандарта:

$$\delta D = \frac{\left(\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}}\right)_{\text{образца}} - \left(\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}}\right)_{\text{стандарта}}}{\left(\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}}\right)_{\text{стандарта}}} \quad (\text{на примере}$$

дейтерия).

Конечный изотопный состав осадков связан не с температурой конденсации как таковой, а с разностью температуры конденсации в месте выпадения осадков и температуры в источнике влаги. Для интерпретации изотопных данных с точки зрения приземной температуры воздуха необходимо знать её связь с температурой кон-

денсации. Измерения изотопного состава керна проводились в ЛИКОС ААНИИ на лазерном анализаторе изотопного состава Picarro L2120-i; применялась технология абсорбционной спектроскопии по затуханию света (WS-CRDS). Затухание происходит за счёт поглощения инфракрасного излучения молекулами воды. Спектр поглощения зависит от типа молекул, т.е. от изотопного состава. Подробно принцип работы прибора описан на официальном сайте компании Picarro<sup>1</sup>.

Перед началом серии измерений изотопного состава по определённому керну проводилась калибровка прибора для оценки точности измерений, определения значений калибровочных коэффициентов и коэффициентов памяти при измерении концентрации изотопов дейтерия  $\delta D$  и кислорода  $\delta^{18}O$ . Все результаты измерений изотопного состава, представленные в настоящей работе, скорректированы с учётом перечисленных коэффициентов. Контроль качества выполнялся через верификацию – повторное выборочное измерение нескольких образцов. Сходимость результатов повторных измерений оказалась не хуже 0,05‰ по  $\delta^{18}O$  и 0,5‰ по  $\delta D$ . Образцы исследуемых ледяных кернов с момента доставки их из Антарктиды в ЛИКОС хранились в замороженном виде при температуре  $-14\text{ }^\circ\text{C}$ , что позволило исключить возможность изотопного фракционирования.

**Данные об изотопном составе осадков.** Для анализа временной изменчивости температуры воздуха в изучаемом секторе Антарктиды использованы данные по кернам четырёх скважин и один региональный сводный ряд изотопного состава осадков, полученный для станции Восток по 12 снежным шурфам и трём неглубоким кернам. Керны получены в разные полевые сезоны специалистами ААНИИ и Санкт-Петербургского горного института (ныне Национальный минерально-сырьевой университет «Горный») при логистической поддержке Российской антарктической экспедиции. Расположение точек бурения, временной охват и разрешение, а также сведения о методе, месте и времени измерения изотопного состава образцов приведены в таблице.

**Данные метеонаблюдений и реанализа.** Для интерпретации данных об изотопном составе

<sup>1</sup>[http://www.picarro.com/technology/cavity\\_ring\\_down\\_spectroscopy](http://www.picarro.com/technology/cavity_ring_down_spectroscopy)

## Ледяные керны, использованные в исследовании

Пункт/ряд	Расположение, ю.ш./в.д., градусы	Высота, м над ур. моря	Временной охват, годы	Датировка <sup>1*</sup> /аккумуляция в пункте бурения, мм в.э. в год <sup>2*</sup> /длина одного образца $\delta_x$ , см <sup>3*</sup>	Метод измерения $\delta_x$ , ‰	Лаборатория и год	Ссылка
105 км	67,433/93,383	1407	1757–1987	Влк., год. слой <sup>1*</sup> /310 <sup>2*</sup> /5 <sup>3*</sup>	Лазерная спектроскопия	ЛИКОС ААНИИ, 2012–2013 гг.	[1]
400 км	69,95/95,617	2777	1254–1987	Модель, синхр./170/100	Масс-спектрометрия	ЛНКОС, г. Сакле, Франция, 1999 г.	Настоящая работа
Сводный ряд для района станции Восток (VRS13)	78,467/106,84	3684	1654–2010	Страт., $\beta$ , влк., снегомер./21/1-7	Лазерная спектроскопия и масс-спектрометрия (всего 15 шурфов и кернов)	ЛНКОС, г. Сакле, Франция, с 1997 г.; ЛИКОС ААНИИ, 2011 г.	[6]
NVFL-1	77,11/95,072	3700	1711–1944	Влк., модель/31/10	Лазерная спектроскопия	ЛИКОС ААНИИ, 2014 г.	Настоящая работа
PV-10	72,805/79,934	2800	1976–2009	Влк., модель/103/2			

<sup>1\*</sup>Влк. – абсолютная датировка по вулканическим пикам в записи электропроводности 1816 и 1992 гг.; «год. слой» – подсчёт годовых слоёв в ряду изотопного состава; «модель» – модель уплотнения при известной аккумуляции; «синхр.» – синхронизация со сводным рядом; «страт.» – стратиграфия в снежных шурфах; « $\beta$ » – абсолютная датировка по пикам  $\beta$ -активности снега в 1955 и 1965 гг.; «снегомер.» – соотнесение с данными наблюдений на снегомерном полигоне.

привлечены данные метеонаблюдений за приземной температурой воздуха (средние годовые значения) на станциях Восток, Мирный, Прогресс<sup>2</sup>, Кейси, Дэйвис<sup>3</sup> (рис. 1).

Пункты метеонаблюдений распределены крайне неравномерно: четыре из пяти имеющихся метеостанций располагаются в береговой зоне, и, следовательно, имеющиеся инструментальные данные о температуре нерепрезентативны для всего рассматриваемого сектора. Для пунктов бурения, расположенных на склоне ледникового щита и в Центральной Антарктиде, где отсутствуют метеонаблюдения, а также для станции Прогресс, где ряд наблюдений составляет всего 12 лет, использованы данные реанализа.

Реанализ представляет собой климатическое моделирование с привлечением данных реальных метеонаблюдений, полученных из разных источников (наземные и морские наблюдения, данные спутниковых наблюдений, радиозонды, радары) Национальным управлением океани-

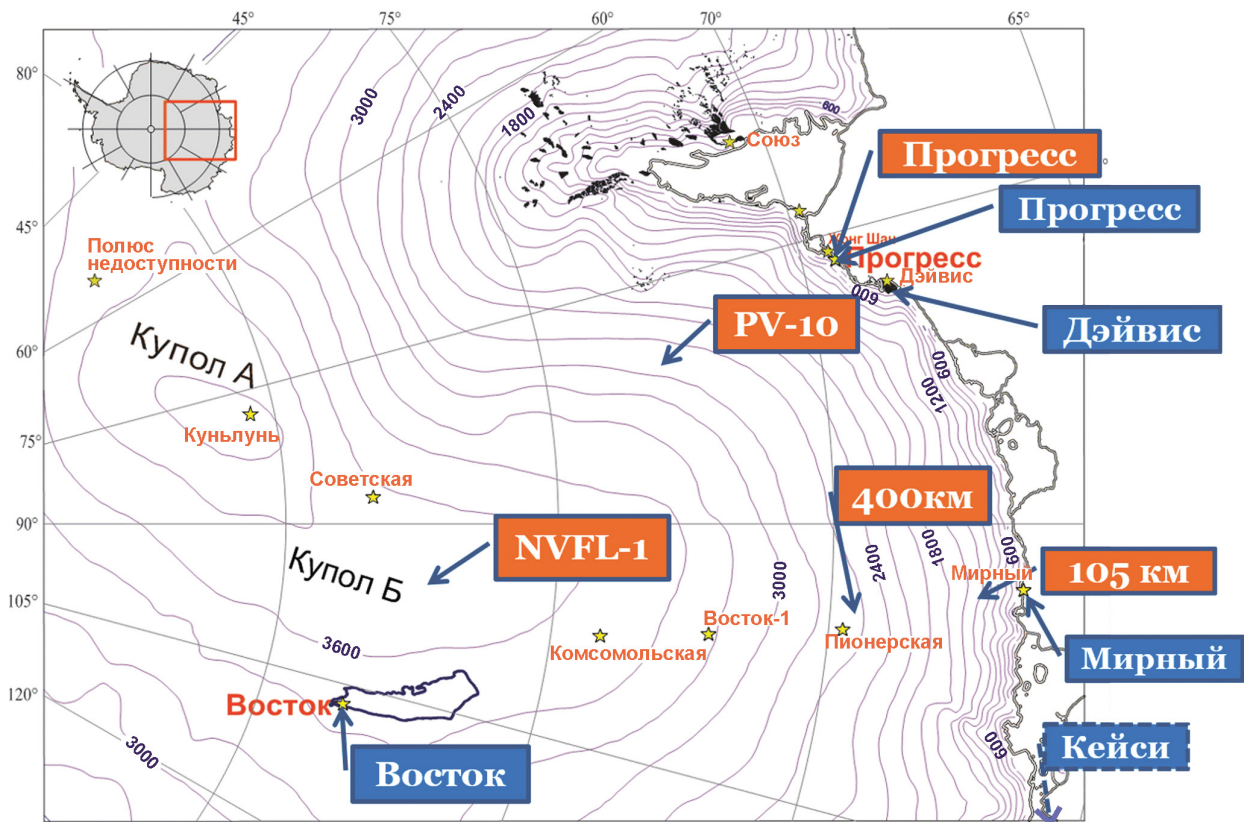
ческих и атмосферных исследований (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) с целью уменьшения влияния моделирования на отображение реальной климатической изменчивости. В настоящей работе использованы результаты реанализа, полученные по модели ERA-40 [14] с пространственным разрешением  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF (данные доступны на сайте<sup>4</sup>).

С учётом воспроизводимости данными реанализа результатов инструментальных наблюдений подобраны оптимальные параметры пространственного разрешения для осреднения модельных данных. Для пунктов бурения 105 км, PV-10 и NVFL-1 подобраны параметры моделирования температуры – во всех случаях использованы геопотенциальные температуры на уровнях, соответствующих атмосферному давлению в пункте бурения; узкое окно применялось только для вос-

<sup>2</sup>[http://www.aari.aq/default\\_ru.html](http://www.aari.aq/default_ru.html)

<sup>3</sup><http://cdiac.ornl.gov/epubs/ndp/ndp032/ndp032.html>

<sup>4</sup><http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/timeseries/timeseries1.pl>



**Рис. 1.** Расположение пунктов бурения и метеонаблюдений.

Синим цветом выделены пункты, для которых имеются данные метеорологических наблюдений, оранжевым – пункты, для которых использованы данные реанализа

**Fig. 1.** The location of drilling sites and meteorological observations.

The sites where meteorological data exists are in blue, the sites where the only reanalysis is available are in orange

произведения температуры в пункте NVFL-1, для других пунктов разрешение составило 5°.

**Данные об индексах циркуляции Южного полушария.** Изотопный состав осадков и скорость снегонакопления в Антарктиде трансформируются под влиянием изменений циркуляции Южного полушария через перенос воздушных масс. Циркуляционный режим описывается индексами, один из которых – индекс дипольного режима (DMI, Dipole Mode Index). Индоокеанский диполь – это объединённый феномен океана и атмосферы, характеризующийся аномально холодными температурами поверхностных вод в юго-восточной экваториальной части Индийского океана и аномально тёплыми поверхностными водами в западной экваториальной области при положительных значениях индекса, и наоборот.

Интенсивность индоокеанского диполя выражается через градиент аномальных температур поверхностных вод между западной экваториальной частью Индийского океана (10° ю.ш. – 10° с.ш. и 50°–70° в.д.) и юго-восточной экваториальной зоной (10° ю.ш. – 0° ш. и 90°–110° в.д.). Значения индекса с 1870 по 2014 г. доступны на сайте<sup>5</sup>.

Антарктическое колебание (AAO, Antarctic Oscillation) определяется как разность атмосферного давления между 45 и 60° ю.ш. Положительный индекс AAO отражает усиление зональной циркуляции, отрицательный – усиление меридиональной циркуляции. Значения индекса AAO с 1979 по 2010 г. доступны на сайте<sup>6</sup>.

Предпринятая нами попытка исследования связи указанных показателей климатической изменчивости с другими индексами циркуля-

<sup>5</sup>[http://www.jamstec.go.jp/frsgc/research/d1/iod/iod/dipole\\_mode\\_index.html](http://www.jamstec.go.jp/frsgc/research/d1/iod/iod/dipole_mode_index.html)

<sup>6</sup><http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>

ции Южного полушария (например, SOI, TPI, PDO) не дала значимых, достоверно интерпретируемых результатов. В статье рассматриваются средние годовые значения перечисленных индексов циркуляции.

**Методика анализа временных рядов.** Для анализа временной изменчивости рядов изотопного состава и её связи с элементами климатической системы Южного полушария были применены методы корреляционного и спектрального анализа. Для исследования взаимосвязи всех рассматриваемых рядов данных использовался парный коэффициент корреляции с оценкой значимости по критерию Стьюдента. Для спектрального анализа использована оценка спектральной мощности (или периодограмма), полученная методом B-Tukey [3, 24] в приложении AnalySeries 2.0.8 [20] для операционной системы MacOS. Метод заключается в расчёте автокорреляционной функции для ряда данных, подборе оптимального окна (весовой функции) в зависимости от значений функции и преобразовании Фурье для вычисления периодограммы. Периодограмма, построенная таким методом, имеет более сглаженный вид, поскольку частоты, имеющие малую спектральную мощность, не отображаются, тем самым облегчая интерпретацию полученного спектра и выделение частот со значимыми колебаниями в ряду.

Фильтрация частотных компонент в рядах велась методом сингулярного спектра (singular spectrum analysis – SSA [4, 9, 24] в приложении AnalySeries. Данный метод позволяет разделить ряд на частотные компоненты, общий нелинейный тренд и случайный шум, не имеющий периодичности, и может быть использован для очищения ряда от шума. В основе метода лежит разложение исходного ряда на частотные компоненты, описываемые с помощью периодических функций (не обязательно  $\sin$  или  $\cos$ ), называемые эмпирическими ортогональными функциями (empirical orthogonal function – EOF), максимально приближёнными к исходному ряду по частоте и амплитуде колебаний на цикле определённой продолжительности.

Для упрощённого представления частотных компонент применён фильтр Гаусса в приложении AnalySeries, выделяющий  $\sin$ – $\cos$  компоненты с периодом, равным рассматриваемой частоте. Данный фильтр выделяет аномалии относительно среднего значения ряда с амплиту-

дой колебаний экстремумов функции, пропорциональной степени выраженности колебания данной частоты на рассматриваемом временном отрезке. Фильтр Гаусса позволяет выделить из ряда колебания любой частоты, даже не выраженные на обычной периодограмме.

## Результаты и обсуждение

**Связь компонентов климатической изменчивости.** В ходе годового цикла на изотопный состав осадков, кроме температуры конденсации, непосредственно связанной с приземной температурой, неизбежно влияют иные факторы, поэтому при годовом осреднении климатический сигнал не выявляется [6, 7]. Поэтому ожидается слабая связь между наблюдаемой местной приземной температурой и изотопным составом осадков, полученным по кернам. Действительно, для рядов изотопного состава, полученных по кернам и снежным шурфам, и рядов метеонаблюдений, полученных на ближайших к пунктам бурения станциях, мы получили статистически незначимые коэффициенты корреляции, варьирующие в пределах  $-0,16 \leq r \leq 0,24$ . При этом имеющиеся ряды средних годовых значений приземной температуры воздуха по данным метеонаблюдений значимо коррелируют друг с другом, указывая на общую региональную температурную изменчивость в индоокеанском секторе, по крайней мере во второй половине XX в. Антарктическое колебание (AAO) значимо отрицательно коррелирует со всеми данными по температуре воздуха, что означает потепление при усилении меридиональной циркуляции и похолодание при зональной [16]. Такая связь объясняется проникновением в глубь материка циклонов полярного фронта, приносящих на континент тепло и осадки. При этом средние годовые значения площади распространения морского льда убывают с ростом температуры воздуха.

Пространственное осреднение должно дать возможность выделения климатической составляющей общей изменчивости в секторе, потому что ни процессы в источнике влаги [23], ни местные условия образования осадков, ни формы снежного рельефа – ничто, кроме региональной температуры, не может однонаправленно и существенно влиять на изотопный состав

осадков в пунктах, расположенных на разных частях склона ледникового покрова на достаточном удалении друг от друга. Кроме того, с увеличением периода осреднения по времени возрастает доля полезного сигнала в рядах. Сводный ряд реконструированных температур в индоокеанском секторе за последние 350 лет представляет собой осреднённые в пространстве и времени изменения температуры воздуха, полученные по данным изотопного состава осадков.

Для предварительной реконструкции сводного ряда изменений температур за последние 350 лет были использованы нормированные ряды изотопного состава, очищенные от шума методом сингулярного спектра. Ряды изотопного состава, как и иные характеристики снега, характеризуются высокой степенью шума, который, как правило, проявляется в виде высокоамплитудных колебаний с плохо выраженной периодичностью около 2–3 лет. Нормирование было необходимо для приведения межгодовой изменчивости значений изотопного состава осадков в разных пунктах к одному уровню.

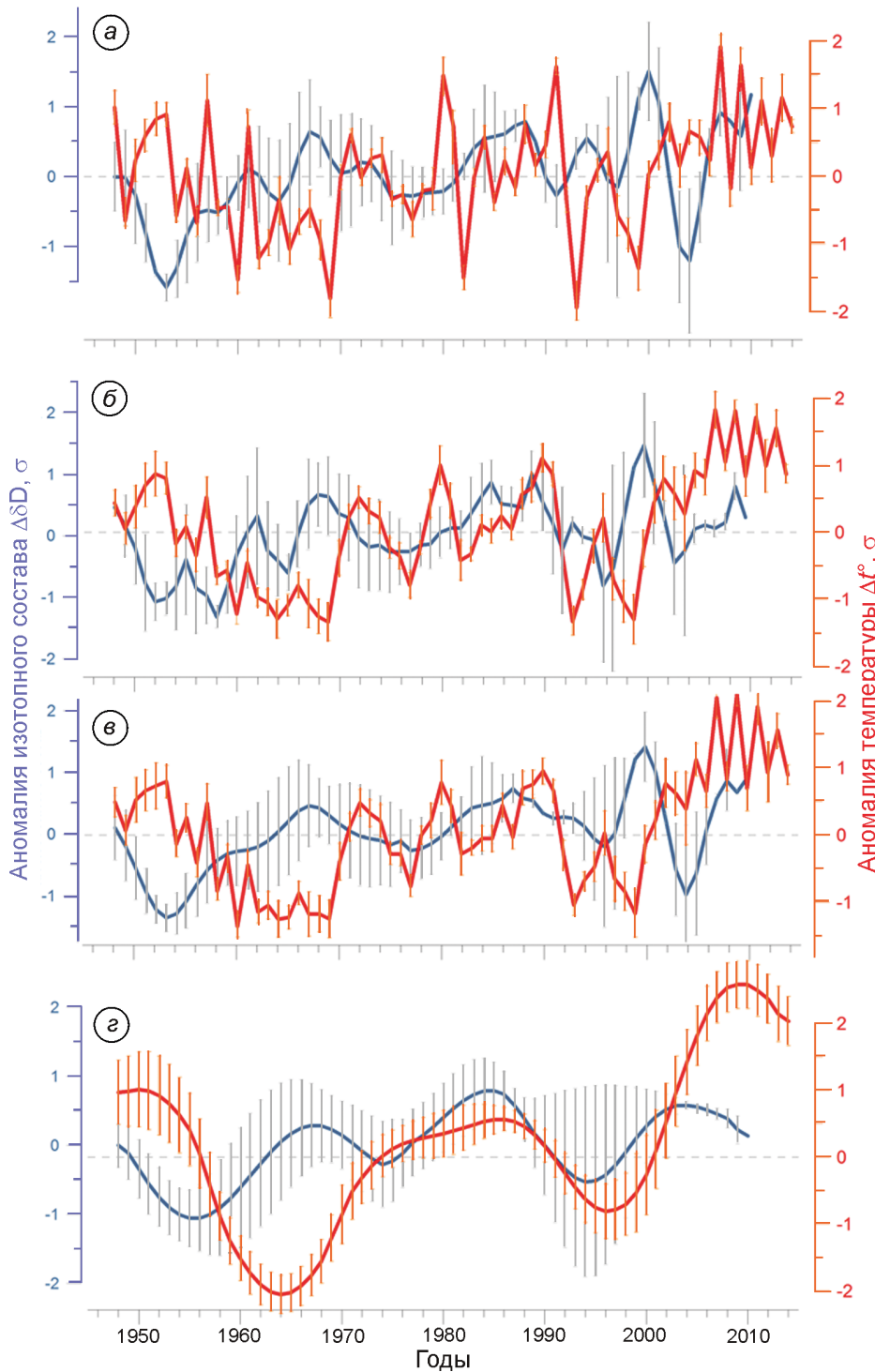
Очевидно, что для оценки степени достоверности отражения изменений местной температуры в изотопном составе осадков необходимо сравнить сводный ряд температур воздуха, полученный по данным метеонаблюдений, со сводным рядом изотопного состава осадков за соответствующий период времени. Для получения первого по пяти рядам метеонаблюдений и по четырём рядам реанализа для точек бурения проведена процедура нормирования и арифметического осреднения нормированных значений. Исходные ряды не были предварительно очищены от шума методом анализа сингулярного спектра (SSA), так как средняя годовая температура представляет собой осреднение более чем по 1000 единичных наблюдений и, следовательно, наличие шума в таких рядах маловероятно.

Как видно на рис. 2, а, совпадения между сводным рядом аномалий изотопного состава осадков и сводным рядом температур минимальны, коэффициент корреляции равен  $-0,1$ . Вероятно, такая слабая связь между изотопным составом осадков и местной температурой воздуха в сводных рядах может быть обусловлена большей амплитудой мелкопериодных колебаний, порождаемых иными факторами, кроме общей изменчивости температуры. Для выявления

свойств и связей рядов на разных циклах проведём анализ периодической изменчивости рядов.

**Сводная климатическая кривая и климатическая изменчивость в секторе.** Операция восстановления сводных климатических кривых по изотопному составу осадков и данным метеонаблюдений была проведена также для рядов с удалёнными компонентами с колебаниями менее 5 лет, менее 8 лет и менее 30 лет при помощи фильтра Гаусса. Ступени фильтрации выбирались на основании наличия циклов как в рядах изотопного состава, так и в рядах метеонаблюдений. Оказалось, что связь и сводного ряда изотопного состава с колебаниями периодом не менее 5 лет, и сводного ряда с колебаниями не менее 8 лет со сводными рядами метеоданных с такими же периодами не значима (коэффициенты корреляции равны  $0,04$  и  $-0,06$ ), и только 30-летние и более длиннопериодные колебания отражают действительную климатическую изменчивость, проявляющуюся в изменении изотопного состава осадков и в изменении местной температуры ( $r = 0,51$ , значим с уровнем значимости  $0,05$ ) (см. рис. 2, в, г).

Совпадение сводного ряда изотопного состава осадков с рядом температур по временному ходу (см. рис. 2, г) даёт основание для температурной калибровки изотопного ряда. Оба ряда выражены в аномалиях относительно своих средних значений за период 1948–2010 гг. Перевод изотопной шкалы в температурную проводится путём приравнивания сигмы нормированного сводного изотопного ряда к сигме нормированного сводного ряда температур в градусах. При этом значения аномалий изотопного состава умножались на отношение сигма температурного ряда/сигма изотопного ряда. Таким образом был получен сводный ряд аномалий восстановленной приземной температуры для индоокеанского сектора Восточной Антарктиды с 1654 по 2010 г. (рис. 3). Выявленные тенденции климатической изменчивости обнаруживают совпадение с таковыми для всей Антарктиды, полученные по данным геохимических исследований ледяных кернов за последние 200 лет [22] (рис. 4). Вероятно, продолжительная отрицательная аномалия температуры в конце XVII в. есть проявление малого ледникового периода в исследуемом секторе (см. рис. 3), а наблюдаемая во второй половине XVIII в. устойчивая отрицательная аномалия отражает завершение малого ледникового периода с последующим



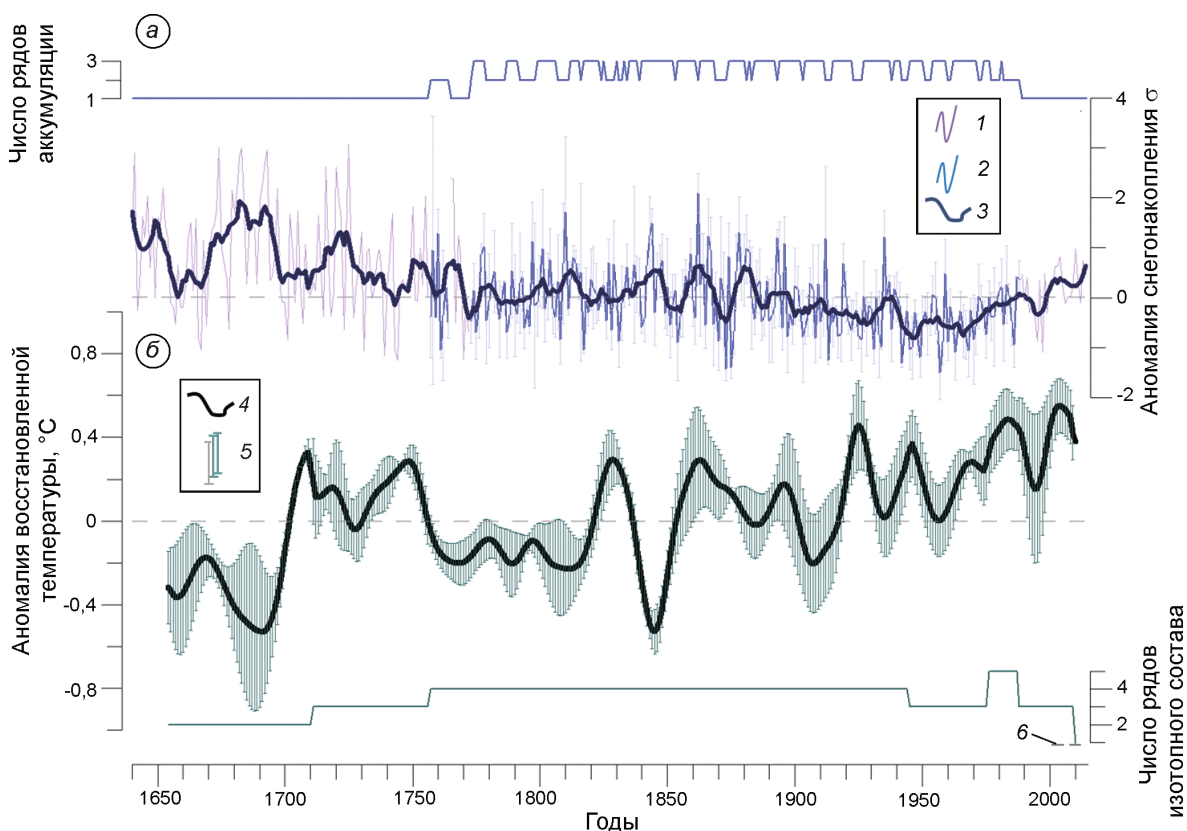
**Рис. 2.** Сводная кривая аномалий изотопного состава осадков, полученная по кернам, и сводная кривая аномалий температур, полученная по данным метеонаблюдений и реанализа (нормирование относительно 1948–2010 гг.) – *a*; сводный ряд изотопного состава и сводный ряд метеонаблюдений с частотными компонентами с периодом: *б* – более 5 лет, *в* – более 8 лет, *г* – более 30 лет

**Fig. 2.** Anomalies of isotopic composition of precipitation and surface air temperature in Indian Ocean sector, obtained by meteorological observation and reanalysis (zero level is represented for 1948–2010 AD) – *a*; anomalies of isotopic composition of precipitation and surface air temperature with frequency components: *б* – lower than 5 years; *в* – the same lower than 8 years; *г* – the same lower than 30 years

общим для всей Антарктиды понижением температуры воздуха в 1830–60-х годах (см. рис. 4).

Аномалии скорости снегонакопления реконструированы по данным двух ледяных кернов (105 км и 200 км), полученных при бурении на склоне Антарктического щита, и по данным сводного ряда, полученного по шурфам, зало-

женным в окрестностях станции Восток. Скорость снегонакопления по данным анализа изотопного состава образцов ледяных кернов и данным об электропроводности оценена путём подсчёта годовых слоёв, умножения на плотность фирново-ледяной толщи и введения поправки на утончение годовых слоёв. Аккумуля-



**Рис. 3.** Изменение скорости снегонакопления с 1640 по 2014 г. по данным геохимических анализов ледяных кернов и стратиграфических описаний снежных шурфов (*а*) и температуры воздуха с 1654 по 2010 г. в индоокеанском секторе Восточной Антарктиды, восстановленная по данным геохимических анализов ледяных кернов (*б*). Сводный ряд аккумуляции: 1 – по одному ряду, дисперсия заведомо больше, 2 – средние годовые значения более чем по одному ряду, 3 – сглаженные методом наименьших квадратов значения с окном 15 лет; 4 – сводный ряд температур; 5 –  $\pm 1$  ошибка среднего ( $\pm 1\sigma/n^{0.5}$ ); 6 – уровень средних значений для периода нормирования 1774–1944 г.

**Fig. 3.** The variability of snow accumulation rate during 1640–2014 AD based on geochemical analysis of ice cores and snow stratigraphy in pits (*a*) and local air temperature during 1654–2010 AD (*b*) in Indian Ocean sector of East Antarctica based on geochemical analysis of the ice cores.

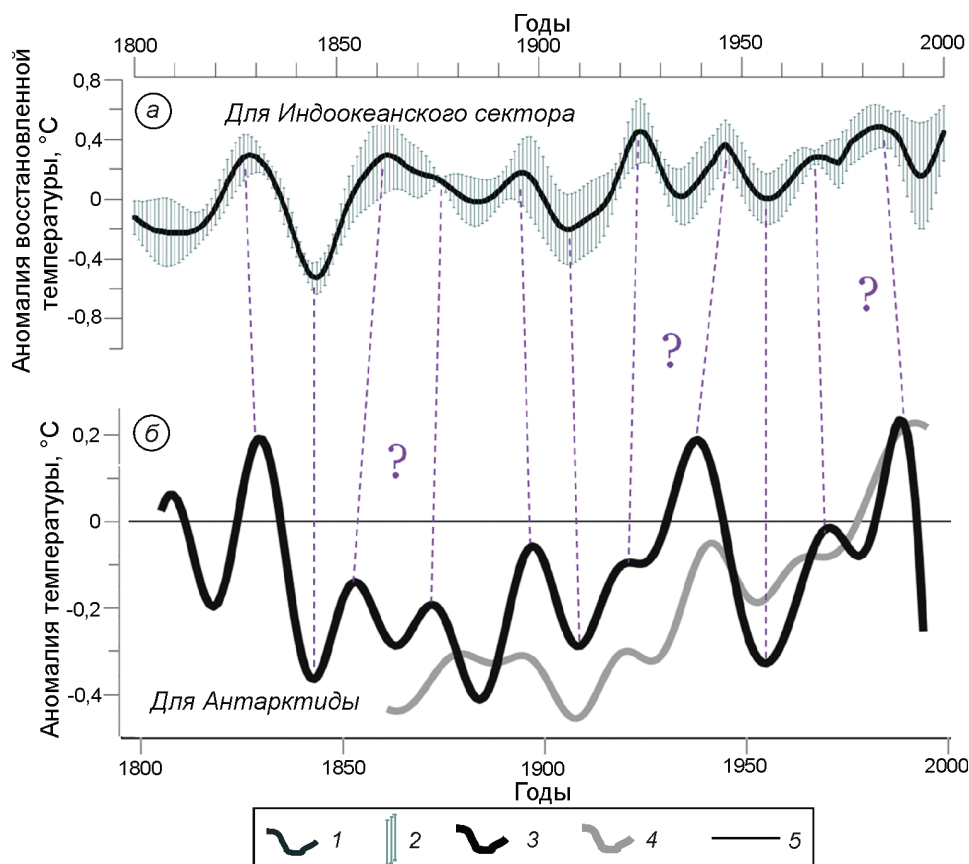
For accumulation rate: 1 – based one series, the dispersion is higher, 2 – mean annual values, 3 – least squares smoothing applying bandwidth 15 years; 4 – reconstructed temperature; 5 –  $\pm 1$  standard error mean ( $\pm 1\sigma/n^{0.5}$ ); 6 – zero level 1774–1944 AD

ции в окрестностях станции Восток оценивалась с помощью выявления годовых слоёв по стратиграфическим описаниям в шурфах и соотнесения с наблюдениями на снегомерном полигоне. Ряды скорости снегонакопления нормированы и осреднены аналогично процедуре получения сводного изотопного ряда (см. рис. 3). При сравнении изменчивости температуры воздуха и аккумуляции обращают на себя внимание противоположно направленные тренды скорости снегонакопления и изотопного состава осадков в исследуемом секторе (см. рис. 3), что нехарактерно для Антарктиды, по крайней мере, на долгопериодных трендах за последние 21 тыс. лет [11], при этом обнаруживаются периоды порядка

50–60 лет, где характер связи изменения местной температуры и аккумуляции снега меняет знак.

Несмотря на довольно хорошее совпадение ряда восстановленных температур и ряда температур, полученных по метеонаблюдениям, наблюдается систематический сдвиг, равный трём–шести годам. Величина сдвига определена кросс-корреляционным методом. Как правило, при климатических реконструкциях в масштабе времени 10–100 лет допускается сдвиг ряда восстановленных температур относительно ряда реально наблюдаемых температур на несколько лет в результате погрешности в датировании керна. Однако в данном случае при рассмотрении сводного ряда температурных аномалий, полу-





**Рис. 4.** Соотнесение полученной сводной климатической кривой по индоокеанскому сектору (а) со сводным рядом аномалий температур в Антарктиде за последние 200 лет по [21] (б).

1 – изменения температуры воздуха в индоокеанском секторе, восстановленная по данным ледяных кернов; 2 –  $\pm 1$  ошибка среднего ( $\pm 1\sigma/n^{0.5}$ ); 3 – изменения температуры воздуха в Антарктиде, восстановленная по данным ледяных кернов; 4 – сводный ряд температур по данным метеонаблюдений в Южном полушарии; 5 – уровень средних значений температур для 1961–1990 гг.

**Fig. 4.** The comparison of reconstructed temperature anomalies in Indian Ocean sector (a) and in whole Antarctica [21] (b) over the past 200 years.

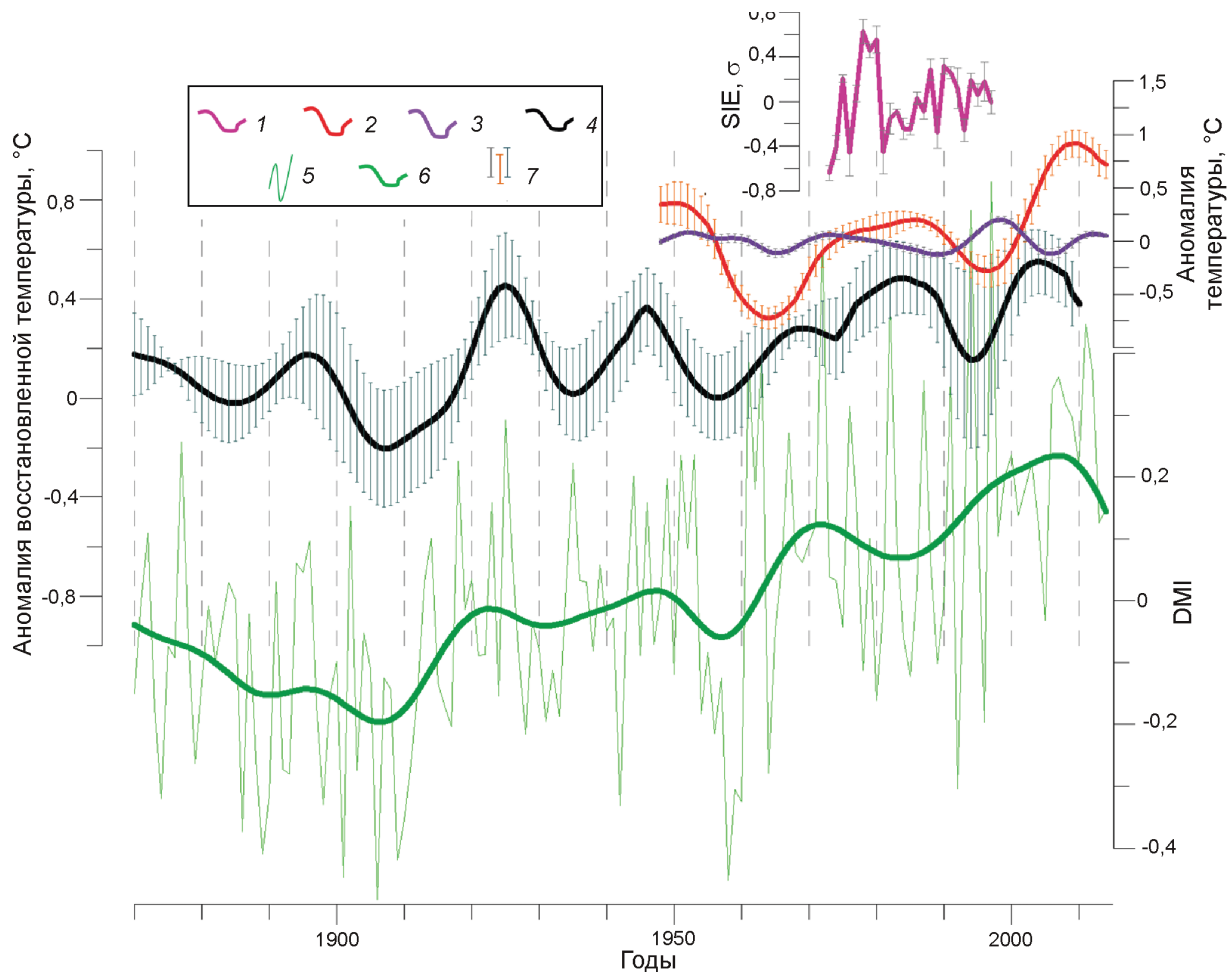
1 – reconstructed surface air temperature anomalies in Indian Ocean sector based on ice core data; 2 –  $\pm 1$  standard error mean ( $\pm 1\sigma/n^{0.5}$ ); 3 – reconstructed surface air temperature anomalies in Antarctica based on ice core data; 4 – stack temperature record in Southern Hemisphere based on meteorological observations; 5 – zero level for 1961–1990 AD

ченного по нескольким ледяным кернам, такой сдвиг представляется невозможным, так как все погрешности в датировке усредняются в процессе построения сводного ряда. Точная причина рассматриваемого запаздывания изменения местной приземной температуры относительно изотопного состава осадков пока не выяснена.

Обнаружено, что среди рассматриваемых индексов циркуляции Южного полушария коэффициент корреляции температуры с индексом DMI уменьшается (рис. 5) при сдвиге на 3–6 лет ряда восстановленных температур; для остальных индексов коэффициент корреляции существенно не меняется. Нельзя утверждать, что изменчивость индоокеанского диполя, описываемая ин-

дексом DMI, полностью отвечает за сдвиг ряда изотопного состава осадков относительно ряда местных температур. Однако данный индекс – показатель аномалий температур поверхностных вод в тропических широтах Индийского океана, что опосредованно влияет на конечный изотопный состав осадков через влияние на условия в источнике влаги (42–46° ю.ш.).

Результаты изотопного моделирования [21] показывают, что изменение температуры в источнике влаги на 1 °C ведёт к изменению изотопного состава осадков на 3‰, а изменение температуры конденсации в месте выпадения осадков на 1 °C – к изменению изотопного состава осадков на 10‰, т.е. местная температура доминиру-



**Рис. 5.** Климатическая изменчивость в индоокеанском секторе с 1870 по 2014 гг.:

1 – степень распространения морского льда на 50–100° в.д.; 2 – сводный ряд приземных температур по данным метеонаблюдений и реанализа; 3 – сводный ряд температур поверхности моря в источнике влаги по данным реанализа; 4 – восстановленная температура; 5 – индекс дипольного режима; 6 – то же, с выделенными 30-летними и более низкочастотными колебаниями; 7 –  $\pm 1$  ошибка среднего ( $\pm 1\sigma/n^{0,5}$ )

**Fig. 5.** Climatic variability in Indian Ocean sector during 1870–2014 AD:

1 – sea ice extent for 50–100° E; 2 – surface air temperature anomalies based on meteorological observations and reanalysis data; 3 – sea surface temperature in drilling sites' moisture source based on reanalysis data; 4 – reconstructed temperature based on isotopic composition analysis; 5 – Dipole Mode Index; 6 – the same with frequency components lower than 30 years; 7 –  $\pm 1$  standard error mean ( $\pm 1\sigma/n^{0,5}$ )

ет в формировании изотопного состава осадков. Для весомых изменений изотопного состава при незначительных изменениях местной температуры потребуется либо существенное изменение температуры в источнике влаги, либо изменение разницы температур в источнике влаги и в месте выпадения осадков. Такое изменение разницы может быть обеспечено за счёт одновременного снижения температуры формирования осадков и увеличения температуры в месте выпадения осадков (и наоборот). Вклад в формирование

изотопного состава осадков оказывают также вовлекаемые новые порции влаги на пути движения воздушной массы. Испарение происходит со всей открытой акватории вплоть до северной границы морского льда, показатель которой – площадь распространения морского льда (sea ice extent – SIE). На рис. 5 показан сводный ряд, полученный путём нормирования и осреднения данных о среднем годовом положении северной границы морского льда на 50–100° в.д. в период с 1973 по 1997 г.<sup>7</sup> Увеличение площади морско-

<sup>7</sup>[https://data.aad.gov.au/aadc/metadata/metadata\\_redirect.cfm?md=/AMD/AU/sea\\_ice\\_extent\\_gis](https://data.aad.gov.au/aadc/metadata/metadata_redirect.cfm?md=/AMD/AU/sea_ice_extent_gis)

го льда ведёт к повышению вклада тёплых вод в формирование воздушной массы и, как следствие, к большему изотопному исчерпыванию на пути движения воздушной массы, т.е. к более лёгкому изотопному составу осадков.

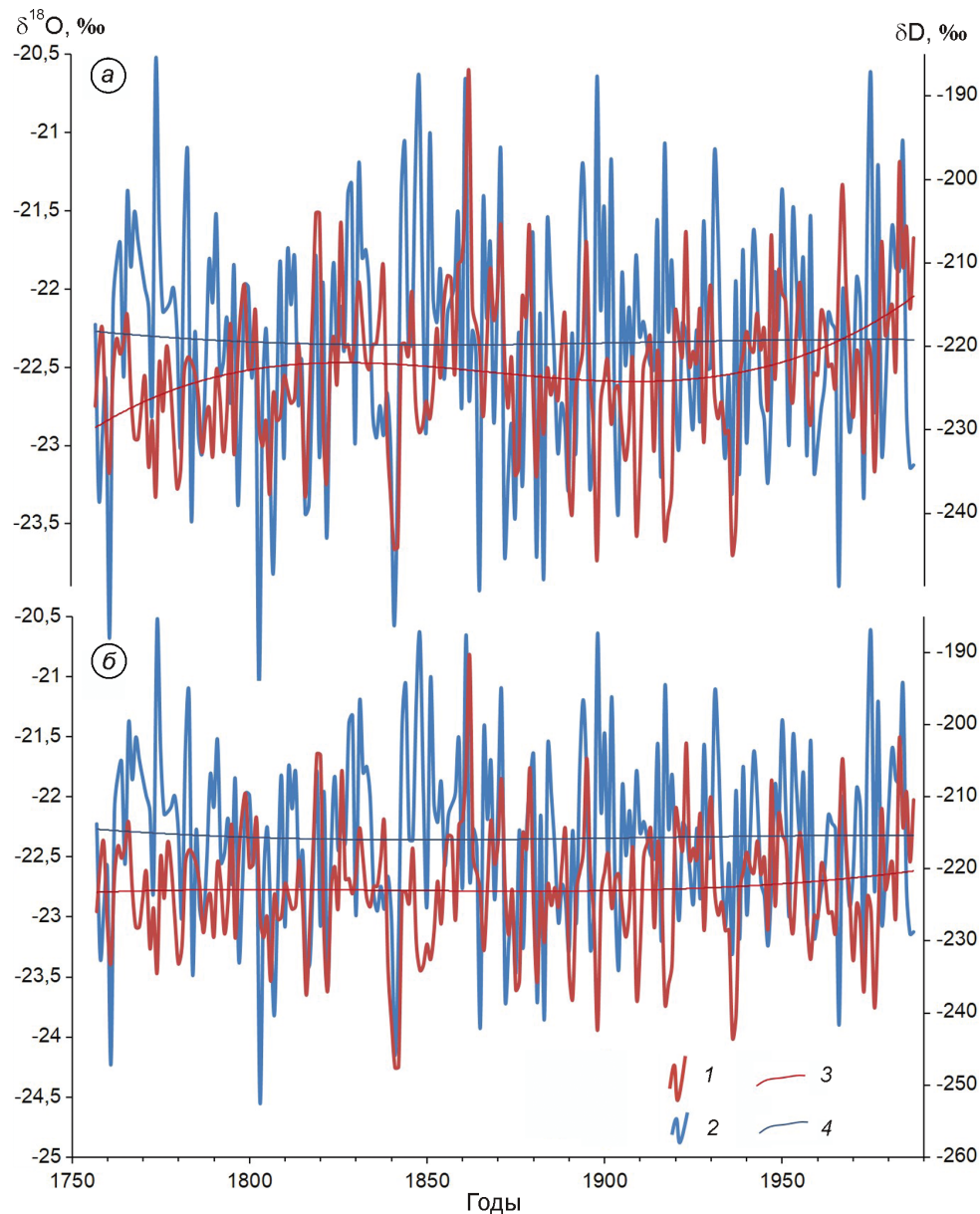
Другой возможной причиной наблюдаемого временного сдвига ряда восстановленной по изотопным данным температуры относительно сводного ряда реально наблюдаемых местных приземных температур в индоокеанском секторе может быть так называемый климатический сдвиг 1970-х годов, проявившийся в резкой одновременной смене знаков индексов циркуляции [5, 17]. Для других пунктов, расположенных в исследуемом секторе Антарктиды, например, для купола Лоу (66,77° ю.ш., 112,8° в.д.), также характерно значительное повышение изотопного состава осадков в это десятилетие [17].

Очевидно, что взаимная температурная изменчивость в источнике влаги и в месте выпадения осадков не полностью объясняет изменчивость изотопного состава осадков в исследуемом секторе. Влияние температуры поверхностных вод в источнике влаги, площади распространения морского льда, а также циркуляционный режим индоокеанского сектора Южного океана безусловно заслуживают более детального исследования, которое мы планируем провести в ближайшем будущем. Тем не менее, уже на данном этапе работы можно утверждать, что реконструированная нами по изотопным данным сводная кривая температуры достаточно хорошо отражает 30-летнюю периодичность климатических изменений в исследуемом секторе Восточной Антарктиды за последние 350 лет.

**О неклиматической причине колебаний.** Существенная часть общей изменчивости временных рядов изотопного состава осадков может быть обусловлена влиянием гляциологических факторов, например миграцией через пункт бурения снежных форм рельефа [2]. Такие вариации и тренды, не связанные с изменением климата, носят локальный характер и не воспроизводятся в ядрах, полученных в разных пунктах рассматриваемой области. Сравним изменчивость изотопного состава осадков в пункте 105-й километр и на куполе Лоу [12], также расположенном в индоокеанском секторе (рис. 6). Связь между исходными рядами статистически незначима ( $r = 0,09$ ). В ряду изотопного состава осадков за последние 250 лет, полу-

ченном по ядру с купола Лоу, не обнаруживается тренда, в то время как изотопный ряд со 105-го километра обнаруживает изменчивость с периодом порядка 120 лет. Анализ периодической изменчивости рядов показывает общие периоды порядка 30, 17–20, 8 и 2–6 лет. Более длиннопериодные колебания продолжительностью около 60 лет обнаружены на куполе Лоу, но слабо проявляются на 105 километре, а 125-летний цикл, напротив, проявляется только на 105-м километре. Колебания с периодом порядка 100 лет, как правило, рассматриваются как климатические и должны проявляться во всем регионе, однако на куполе Лоу они не обнаружены, несмотря на достаточную длину ряда. Если вычестить 125-летнюю компоненту из ряда изотопного состава осадков на 105-м километре, то тренды обоих рядов совпадают лучше. Коэффициент корреляции между рядами изотопного состава при этом существенно не улучшается (0,1), что объясняется наличием высокоамплитудной изменчивости с периодом 2–3 года, связанной со стратиграфическим шумом и неопределённостями датировки. По данным спутниковой альтиметрии, предоставленной Л.Н. Васильевым (Институт географии РАН), в районе 105-го километра трассы Мирный–Восток обнаружены волны длиной порядка 5 км и высотой первые метры, напоминающие мегадюны [2, 10]. Для оценки скорости миграции этих форм снежного рельефа необходимы данные радарной съёмки. На текущем этапе мы можем лишь предположить, что 125-летний период может быть вызван миграцией через пункт бурения мегадюн, а значит, и изменением режима отложения и переноса ветром летних и зимних осадков, что и даёт наблюдаемые изменения в средних годовых значениях изотопного состава осадков [2].

Для рядов изотопного состава на 105-м километре и куполе Лоу также проведён корреляционный анализ частотных компонент, в результате которого обнаружена отрицательная связь ( $r = -0,25$ ) частотных компонент рядов изотопного состава с периодом 18–20 лет. Вероятно, такой характер связи обусловлен разной природой колебания указанной продолжительности в изотопном составе осадков. На куполе Лоу в изотопном составе осадков отражена изменчивость местной температуры, в то время как на 105-м километре частотная компонента такой продолжительности коррелирует отрицательно с местной температурой по



**Рис. 6.** Средние годовые значения изотопного состава осадков на 105 км (1) и на куполе Лоу (2) 1757–1987 гг. и полиномиальные аппроксимации (3 и 4 соответственно) – а; б – то же с удалённым 125-летним колебанием для 105 км

**Fig. 6.** Mean annual values of isotopic composition of precipitation based on 105 km (1) and Law Dome (2) ice cores in 1757–1987 AD with the polynomial approximations (3 and 4 respectively) – а; б – the same with filtered 125-years frequency component for 105 km series

данным метеонаблюдений и отражает изменения в источнике влаги – вероятнее всего смещение источника на несколько градусов к северу или к югу, вызывающее существенное изменение температуры формирования воздушной массы. При этом температура в месте выпадения осадков остаётся постоянной или слабо растёт. Возможность отрицательной связи изотопного состава осадков

и местной температуры в этом пункте продемонстрирована путём изотопного моделирования [1].

Влияние неклиматических («рельефообусловленных» [2]) факторов ставит под сомнение соответствие климатических рядов, восстановленных по кернам отдельных скважин, реальной климатической изменчивости в изучаемом районе. Использование сводных климатических рядов по

нескольким кернам приводит к формированию вариаций, не являющихся общими для всего исследуемого сектора, и существенно повышает надёжность выполненных палеорекопструкций.

### Выводы

По данным об изотопном составе ледяных кернов, полученных из скважин в индоокеанском секторе Восточной Антарктиды, восстановлены параметры климатической изменчивости за последние 350 лет – температура воздуха и скорость снегонакопления. Сводный ряд изотопного состава осадков и сводный ряд местной приземной температуры, полученный по данным метеонаблюдений и реанализа, сдвинуты относительно друг друга на 3–6 лет. Авторы видят две возможные причины этого сдвига, которые могут быть связаны либо с влиянием изменений условий в источнике влаги на конечный изотопный состав осадков, либо с проявлением так называемого климатического сдвига 1970-х годов [5, 17].

Выявлена неклиматическая причина долговременных (более 102 лет) колебаний в рядах изотопного состава на примере керна со 105-го километра, обусловленная, вероятно, миграцией через пункт бурения снежных форм рельефа. Проведённое исследование и применённый метод восстановления ряда температуры по данным геохимических анализов ледяных кернов ещё раз продемонстрировали необходимость использования кернов нескольких скважин для получения достоверного регионального климатического сигнала. В будущем мы планируем провести более детальное исследование проявившегося во всей Антарктиде похолодания 1830–60-х годов и его причин, а также природы отрицательной корреляции изотопного состава осадков и местной температуры, обнаруженной на циклах определённой продолжительности и, вероятно, связанной с изменениями в источнике влаги.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность Российской антарктической экспедиции за обеспечение логистических операций, А.В. Козачек за помощь в лабораторных исследованиях и Ю.А. Шибаеву за помощь в полевых работах.

Настоящее исследование выполнено в рамках проекта РФФИ 13-05-00607.

### Литература

1. Владимирова Д.О., Екайкин А.А. Климатическая изменчивость в секторе моря Дейвиса (Восточная Антарктида) за последние 250 лет по данным геохимических исследований ледяного керна из скважины 105 км // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. Вып. 1 (99). С. 102–113.
2. Екайкин А.А., Липенков В.Я., Попов С.В., Туркеев А.В., Козачек А.В., Владимирова Д.О. Пространственная изменчивость характеристик снежного покрова антарктических мегадюн в районе подледникового озера Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. Вып. 4 (102). С. 78–89.
3. Blackman R.B., Tukey J.W. The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering. New York: Dover publications, 1959. 190 p.
4. Broomhead D.S., King G.P. Extracting qualitative dynamics from experimental data // Physical Review D. 1986. V. 20. P. 217–236.
5. Crawford R.M.M. Plants at the margin: ecological limits and climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 494 p.
6. Ekaikin A.A., Kozachek A.V., Lipenkov V.Ya., Shibaev Yu.A. Multiple climate shifts in the Southern Hemisphere over the past three centuries based on glaciological and geochemical investigations in central Antarctic snow pits and ice cores // Annals of Glaciology. 2014. V. 55 (66). P. 259–266.
7. Ekaikin A.A. Meteorological regime of central Antarctica and its role in the formation of isotope composition of snow thickness. PhD thesis. Université Joseph Fourier, Grenoble, 2003. 136 p.
8. EPICA community members Eight glacial cycles from an Antarctic ice core // Nature. 2004. V. 429. P. 623–628.
9. Fraedrich K. Estimating the dimension of weather and climate attractors // Journ. of Atmospheric Sciences. 1986. V. 43. P. 419–432.
10. Frezzotti M., Gandolfi S., Urbini S. Snow megadunes in Antarctica: Sedimentary structure and genesis // Journ. of Geophys. Research. 2002. V. 107, ACL. P. 1–12.
11. Frieler K., Clark P.U., He F., Buizert C., Reese R., Ligtienberg S.R.M., van den Broeke M.R., Winkelmann R., Levermann A. Consistent evidence of increasing Antarctic accumulation with warming // Nature Climate Change. 2015. V. 5. P. 348–352.
12. Goosse H., Braida M., Crosta X., Mairesse A., Masson-Delmotte V., Mathiot P., Neukom R., Oerter H., Philippon G., Renssen H., Stenni B., van Ommen T., Verleyen E. Antarctic temperature changes during the last millennium: evaluation of simulations and reconstructions // Quaternary Science Reviews. 2012. V. 55. P. 75–90.
13. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental

- tal Panel on Climate Change. [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.
14. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woolen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bulletin of American Meteorological Society. 1996. V. 77. P. 437–471.
  15. Krinner G., Guicherd B., Ox K., Genthon C., Magand O. Influence of oceanic boundary conditions in simulations of Antarctic climate and surface mass balance change during the coming century // Journ. of Climate. 2008. V. 21. P. 938–962.
  16. Kwok R., Comiso J.C. Spatial patterns of variability in Antarctic surface to the Southern Hemisphere Annular Mode and the Southern Oscillation // Geophys. Research Letters. 2002. V. 29 (14). P. 1–4.
  17. Masson-Delmotte V., Delmotte M., Morgan V., Etheridge D., van Ommen T., Tartarin S., Hoffmann G. Recent southern Indian Ocean climate variability inferred from a Law Dome ice core: new insights for the interpretation of coastal Antarctic isotopic records // Climate Dynamics. 2003. V. 21. P. 153–166.
  18. Mayewski P.A., Meredith M.P., Summerhayes C.P., Turner J., Worby A., Barrett P.J., Casassa G., Bertler N.A.N., Bracegirdle T., Naveira Garabato A.C., Bromwich D., Campbell H., Hamilton G.S., Lyons W.B., Maasch K.A., Aoki S., Xiao C., van Ommen T. State of the Antarctic and Southern ocean climate system // Reviews of Geophysics. 2009. V. 47. RG1003. P. 1–38.
  19. Monaghan A.J., Bromwich D.H., Wang S.H. Recent trends in Antarctic snow accumulation from polar MM5 simulations // Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences. 2006. V. 364. P. 1683–1708.
  20. Paillard D. Macintosh program performs time-series analysis // Earth and Space Science News. 1996. V. 77. № 39. P. 379.
  21. Salamatin A.N., Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya. Modelling isotopic composition in precipitation in Central Antarctica // Data of Glaciological Studies. 2004. Issue 97. P. 24–34.
  22. Schneider D.P., Steig E.J., van Ommen T.D., Dixon D.A., Mayewski P.A., Jones J.M., Bitz C.M. Antarctic temperatures over the past two centuries from ice cores // Geophys. Research Letters. 2006. V. 33. L16707. P. 1–5.
  23. Sodemann H., Stohl A. Asymmetries in the moisture origin of Antarctic precipitation // Geophys. Research Letters. 2009. V. 36. L22803. P. 1–5.
  24. Vautard R., Ghil M. Singular spectrum analysis in non-linear dynamics, with applications to paleoclimatic time series // Physical Review D. 1989. V. 35. P. 395–424.

## Summary

The temperature and snow accumulation rate anomaly over the past 350 years have been reconstructed based on isotopic composition of shallow ice cores and snow pits samples as well as glaciological observations in pits and at stake farms located in Indian Ocean sector of East Antarctica. Different statistical techniques have been applied in order to obtain real climatic signal and eliminate noise such as: Blackman-Tukey spectral analysis, singular spectrum analysis, Gaussian frequency components filtration. The lack of meteorological observations has been compensated by ERA-40 reanalysis data. The relationship of temporal variability of isotopic composition of precipitation and surface air temperature in ensemble with sea surface temperature has been analyzed. The fingerprints of Little Ice Age and climatic shift 1970s have been defined. The common for whole Antarctica cooling in 1830–1860 AD has been shown but the reasons have to be explained. There is also a systematic shift of 3–6 years between anomalies of isotopic composition of precipitation and surface air temperature, which can be explained through secondary influence of moisture source processes, what was defined by obtaining the better correlation with Dipole Mode Index for Indian Ocean.

We have also suggested the influence of non-climatic drivers on the formation of signal in stable water isotopic series by consideration the closely located 105 km (67.43°S 93.38°E) and Law Dome (66.77°S 112.8°E) ice cores. On the time scale more than hundred years it can potentially be the migration of snow relief forms trough the drilling site (mega-dunes) and on the time scale of about 18–20 years it could be the shift of moisture source and thus sharp changes in sea surface temperature. The research of negative relationship between stable water isotopic composition of the precipitation and site temperature is ongoing, as the potential driver the changes in moisture source are considered but have to be proofed.