

Атмосферная циркуляция в индоокеанском секторе Восточной Антарктиды за последние 200 лет по данным изучения химического состава снежно-фирнового покрова

© 2017 г. Э.Ю. Осипов^{1*}, О.П. Осипова², Л.П. Голобокова¹, Т.В. Ходжер¹

¹Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия; ²Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия
*eduard@lin.irk.ru

Atmospheric circulation in the Indian Ocean sector of East Antarctica over the last 200 years according to chemical studies of snow-firn cover

E.Yu. Osipov^{1*}, O.P. Osipova², L.P. Golobokova¹, T.V. Khodzher¹

¹Limnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia;
²V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia
*eduard@lin.irk.ru

Received September 30, 2016

Accepted February 15, 2017

Keywords: Antarctica, atmospheric circulation, reconstruction of climate, snow-firn cores, sodium.

Summary

Spatial and temporal variability of a sea-salt aerosol (Na^+) concentration was investigated in snow-firn cores and snow pits taken at four sites of the Indian Ocean sector of the East Antarctica (along a profile between stations Progress and Vostok: PV-10, NVFL-1, SW-42, and the Vostok point). In long annually resolved Na^+ records, we had revealed the following periodicities: 17 to 95-year (Vostok) and 29 to 52-year (NVFL-1), while the shorter records are characterized by 8-year periodicity. The Na^+ concentrations decrease as the snow accumulation increases (especially, at the Vostok station), and this is evidence for a presence of «dilution effect» in the sites with the great part of «dry precipitation». The closest relationship was revealed between changes in flows of Na^+ at points SW-42, and PV-10. Variability of the Na^+ fluxes had been linked to the circulation indices (AAO, PDO, SOI, MEI, SPO) and the sea level pressure in the Southern Hemisphere, as well as to occurrence of Elementary Circulation Mechanisms (ECM). The revealed irregularity of the Na^+ precipitation over the area under investigation is caused by different atmospheric circulation patterns as well as by influence of basic Action Centers of the Atmosphere (ACA) in the Southern Hemisphere. The closest relationship is found to take place with South Pacific ACA (Vostok, 1976–2009) and with the South Indian ACA (SW-42 and PV-10). A presence of distant atmospheric relations (including one with El Nino) had been revealed for the inland areas. Changes in features of the atmospheric circulation in the South Indian Ocean over the last 200-year period have been reconstructed on the basis of summarized Na^+ records from the Vostok station area. Distinctive feature of the atmospheric circulation is the 40-year periodicity with its increasing intensity during the following periods: 1805–1820, 1830–1860, 1890–1900, 1940–1950, and 1980–2000. In addition, we had revealed that changes in the atmospheric circulation in the Indian Ocean (Southern Hemisphere) were synchronous with similar variability of the circulation in the Siberian (Northern Hemisphere) sector.

Citation: Osipov E.Y., Osipova O.P., Golobokova L.P., Khodzher T.V. Atmospheric circulation in the Indian Ocean sector of East Antarctica over the past 200 years reproduced from data on chemical composition of snow-firn cover *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017. 57 (2): 170–184. [In Russian]. doi:10.15356/2076-6734-2017-2-170-184.

Поступила 30 сентября 2016 г.

Принята к печати 15 февраля 2017 г.

Ключевые слова: Антарктида, атмосферная циркуляция, натрий, реконструкция климата, снежно-фирновые керны.

По данным изучения химического состава снежно-фирнового покрова в индоокеанском секторе Восточной Антарктиды установлены пространственно-временные изменения аккумуляции морского аэрозоля (Na^+). Исследованы корреляционные связи аккумуляции Na^+ с индексами циркуляции и полем давления Южного полушария, а также элементарными циркуляционными механизмами. Впервые выполнена реконструкция интенсивности региональной циркуляции за последние 200 лет.

В статье используются следующие сокращения:

САК — Северо-Атлантическое колебание

ЦДА — центр действия атмосферы

ЦПВ — циркумполярный вихрь

ЭЦМ — элементарные циркуляционные механизмы

ЮПК — Южно-Полярное колебание

Введение

Циркуляция атмосферы в Антарктике тесно связана с общей планетарной циркуляцией. Один из показателей интенсивности атмосферной циркуляции во внутриконтинентальных районах Антарктиды — интенсивность переноса аэрозолей морского происхождения. К наиболее надёжному индикатору переноса морского аэрозоля в различные районы Антарктиды относится содержание Na^+ в антарктическом снеге [1]. Исследование изотопных профилей из района станции Восток позволило реконструировать изменения температуры воздуха и аккумуляции снега за пределами периода инструментальных наблюдений [2–5]. В то же время реконструкции атмосферной циркуляции по данным внутриконтинентальных районов Антарктиды крайне редки. Сотрудничество с ААНИИ и Российской Антарктической экспедицией позволило нам получить ряд данных по

шурфам и снежно-фирновым кернам из района Восточной Антарктиды. Задачи данной работы — исследовать пространственно-временные изменения содержания морского аэрозоля (Na^+) в снежно-фирновом покрове индоокеанского сектора Восточной Антарктиды и выявить связи этих изменений с циркуляционными процессами в атмосфере Южного полушария. Кроме того, впервые сделана попытка реконструировать изменения интенсивности атмосферной циркуляции в регионе за последние 200 лет.

Материалы и методы исследований

Район исследований и исходные данные. Для изучения распределения морского аэрозоля в снежно-фирновом покрове Восточной Антарктиды использованы материалы по четырём кернам и двум шурфам, полученные в 2008–2013 гг. (рис. 1, табл. 1). Места отбора проб расположе-

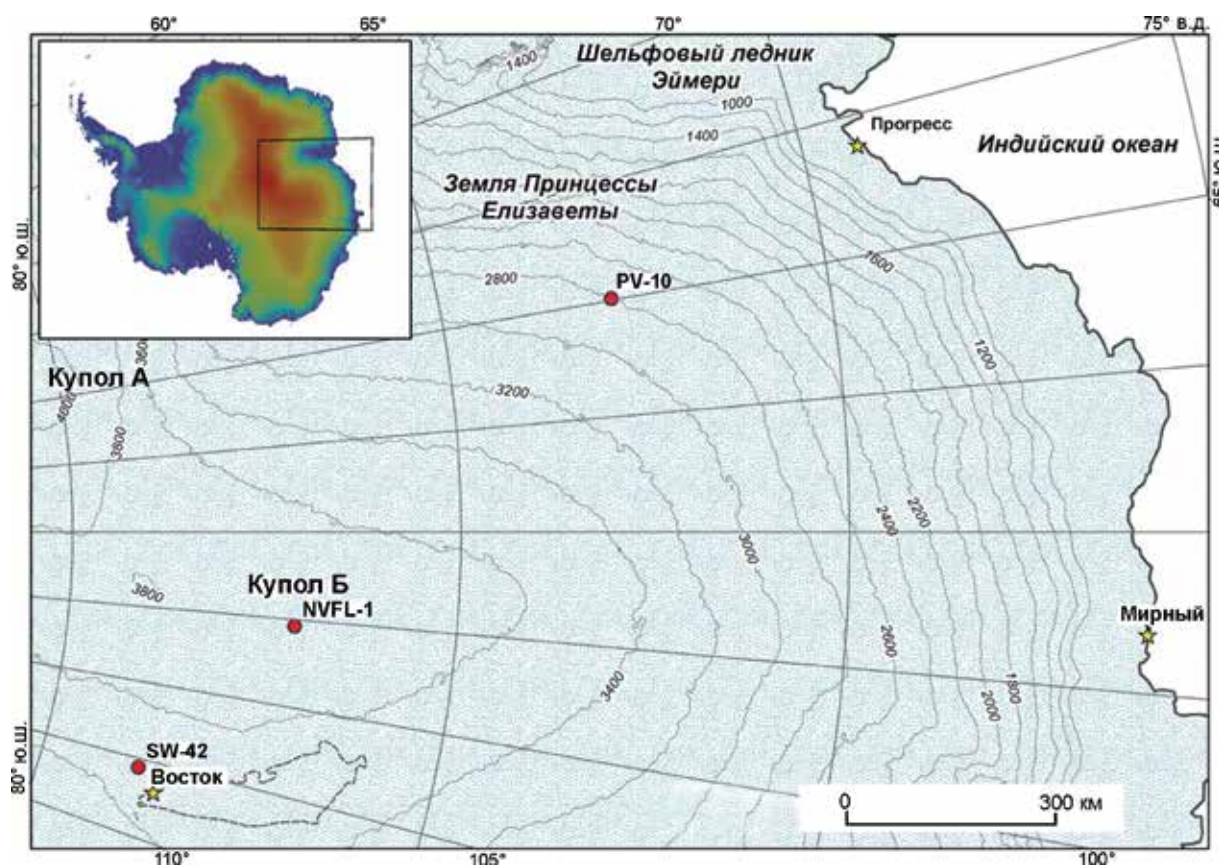


Рис. 1. Расположение исследованных разрезов снежно-фирновой толщи (буровые керны и шурфы) в Восточной Антарктиде

Fig. 1. Location of sampling sites (cores and snow pits) in East Antarctica

Таблица 1. Характеристика снежно-фирновых кернов и разрезов шурфов в Восточной Антарктиде, использованных в настоящей работе

Керн/ шурф	Год отбора	Местоположение (координаты и высота над ур. моря)	Глубина, см	Аккумуляция, мм в.э.	Частота опробования (проб/год аккумуляции)
VK-07 (керн)	2007	Ст. Восток, 300 м к ЮЗ от 5Г (78,47° ю.ш., 106,82° в.д., 3490 м)	381–1929 (1 проба = 2,1 см)	20,2–34,3* (23,2 мм по полигону Восток за 1970–2011 гг.)	2,6
VKT-55 (керн)	2010	Ст. Восток, 150 м от VK-07 (78,47° ю.ш., 106,84° в.д., 3490 м)	210–835 (с пропусками, 1 проба = 2 см)	22,6–22,9* (23,2 мм по полигону Восток за 1970–2011 гг.)	2,6
VK-55 (шурф)	2010	1,6 км к ЗЮЗ от ст. Восток (78,47° ю.ш., 106,77° в.д., 3490 м)	0–200 (1 проба = 2 см)	26,7* (23,2 мм по полигону Восток за 1970–2011 гг.)	3,0
SW-42 (шурф)	2013	42 км к ЮЗ от ст. Восток (78,74° ю.ш., 105,59° в.д., 3495 м)	0–177 (1 проба = 3 см)	23,4*	2,4
NVFL-1 (керн)	2008	Верхняя часть линии тока NVFL, 10 км от Купола Б (77,09° ю.ш., 95,38° в.д., 3755 м)	530–2083 (1 проба = 2 см)	26,7–35,9*	3,0
PV-10 (керн)	2010	400 км от ст. Прогресс по трассе Прогресс–Купол Б (72,80° ю.ш., 79,93° в.д., 2760 м)	0–754 (1 проба = 2 см)	111,0**	11,7

*Средние значения аккумуляции, рассчитанные между вулканическими горизонтами; **значения аккумуляции годового разрешения, рассчитанные по пикам натрия.

Таблица 2. Результаты датирования снежно-фирновых разрезов

Разрез	Вулканические извержения, по маркирующим горизонтам которых выполнено датирование	Временной интервал	Ссылка
VK-07	Лонг-Айленд, 1660 г.; Неизвестный, 1809 г.; Тамбора, 1815 г.; Кракатау, 1883 г.	1636–1936 гг. (25 лет пропущено)	[8]
VKT-55	Кракатау, 1883 г.; Агунг, 1963 г.	1858–1976 гг. (14 лет пропущено)	[8]
VK-55	Пинатубо, 1991 г.	1976–2009 гг.	[8]
SW-42		1988–2013 гг.	Данная работа
NVFL-1	Неизвестный, 1809 г.; Тамбора, 1815 г.; Кракатау, 1883 г.	1666–1926 гг.	
PV-10	Пинатубо, 1991 г. и сезонные пики Na ⁺	1977–2010 гг.	

ны вдоль трассы станция Прогресс – станция Восток на высотах от 2760 до 3760 м. По разным данным, средняя скорость аккумуляции в исследованных пунктах составляет от 23 до 111 мм в.э./год. Данные по двум кернам (VK-07 и VKT-55) и двум шурфам (VK-55 и SW-42) из района станции Восток использованы для построения сводного ряда для этого района (V_{st}).

Химический анализ и датирование образцов.

В лаборатории гидрохимии и химии атмосферы Лимнологического института Сибирского отделения РАН керны очищали и разрезали с шагом 2–3 см, что составляет от трёх до 12 измерений за год аккумуляции. Концентрацию главных ионов измеряли методом ионной хроматографии. Методика подготовки проб и аналитических измерений изложена в наших исследова-

ниях [6–8]. В настоящей работе использованы только данные по Na⁺. Датирование разрезов велось по маркирующим горизонтам, содержащим продукты шести исторических извержений низкоширотных вулканов с учётом данных измерения плотности (табл. 2). В качестве вулканических сигналов мы использовали пики неморского сульфата. Методика выявления сульфатных пиков, соответствующих вулканическим событиям, детально изложена в работе [8]. Продолжительность исследованных временных рядов (Na⁺) составляет от 26 (SW-42) до 374 лет (сводный ряд V_{st}). Из-за неполноты данных по двум кернам со станции Восток (VK-07 и VKT-55) суммарно 31 год сводного профиля был пропущен. Для датировки керна PV-10 дополнительно использовались сезонные пики Na⁺.

При исследовании связи между аккумуляцией морского аэрозоля и атмосферной циркуляцией логичнее использовать не концентрацию натрия (Na^+), а его поток Na_f^+ (на единицу площади в единицу времени), особенно при сравнении районов с разной скоростью аккумуляции. Кроме того, во внутриконтинентальных районах с высокой долей «сухого осаждения» аэрозоля при увеличении скорости аккумуляции (даже при постоянном потоке аэрозоля) может проявляться так называемый «эффект разбавления» концентрации. Для перевода измеренных концентраций в годовые потоки для всех разрезов (кроме PV-10) использованы скорости аккумуляции (см. табл. 1), рассчитанные между маркирующими вулканическими горизонтами (см. табл. 2), а также данные по изменению плотности снега (фирна) с глубиной. Это позволило рассчитать суммарные годовые потоки натрия [в $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{ год})$] для каждого разреза. Для PV-10 скорость аккумуляции рассчитана с годовым разрешением по вулканическим горизонтам и сезонным пикам натрия. При построении сводного ряда V_{st} годовые значения Na_f^+ каждого ряда (VK-07, VKT-55, VK-55 и SW-42) предварительно нормировались по среднему значению. В настоящей работе использованы данные только за период 1800–2013 гг.

Индексы атмосферной циркуляции Южного полушария. Влияние интенсивности атмосферной циркуляции в Южном полушарии на перенос Na^+ оценивалось на основе количественных индексов ААО, SOI, MEI и PDO, значения которых получены с сайта Центра климатического прогнозирования (США) [9].

Индекс Антарктического колебания (Antarctic Oscillation – ААО) определяется как первая главная компонента поля аномалий геопотенциала (по отношению к периоду 1979–2000 гг.) изобарической поверхности 700 гПа (от 20° ю.ш. к Южному полюсу) [10]. Антарктическое колебание – ведущая мода крупномасштабной циркуляции в атмосфере Южного полушария, которая характеризует степень её зональности, особенно в околополярной области [11]. Поскольку зональное осреднение давления по широте (индекс ААО) может сглаживать пространственные особенности поведения атмосферной циркуляции, дополнительно применялся **индекс Южно-Полярного колебания (ЮПК)** [12]. По

аналогии с индексом Северо-Атлантического колебания (САК) в Северном полушарии индекс ЮПК характеризует интенсивность западно-восточного переноса в Южном полушарии. Индекс рассчитан для индоокеанского сектора Южного полушария как разность приземного атмосферного давления между 30 и 65° ю.ш. на меридианах 60 , 90 и 120° в.д. с использованием данных реанализа NCEP/NCAR месячного разрешения за период 1949–2013 гг. [13].

Индекс Южного колебания (Southern Oscillation Index – SOI) – один из показателей крупномасштабных колебаний атмосферного давления между западной и восточной частями тропической зоны Тихого океана – традиционно рассчитывается как разность сглаженных аномалий давления на станциях Таити и Дарвин [14]. Продолжительные периоды отрицательных значений индекса SOI соответствуют событиям Эль-Ниньо, а положительных – Ла-Нинья.

Многомерный индекс Эль-Ниньо (Multivariate ENSO Index – MEI) характеризует интенсивность атмосферно-океанического феномена Эль-Ниньо и определяется как первая главная компонента значений шести климатических характеристик тропической области Тихого океана (давление на уровне моря, зональный и меридиональный компоненты приземного ветра, температура поверхности океана и воздуха, облачность) [15]. Положительные значения индекса показывают усиление Эль-Ниньо, а отрицательные – Ла-Нинья.

Индекс Тихоокеанского декадного колебания (Pacific Decadal Oscillation – PDO) характеризует долгопериодные изменения температуры поверхности северной части Тихого океана [16] и рассчитывается как первая главная компонента месячных аномалий поверхностной температуры в северной части Тихого океана к северу от 20° с.ш.

Элементарные циркуляционные механизмы. Для оценки влияния макропроцессов атмосферной циркуляции на перенос морского аэрозоля использованы данные о продолжительности **элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ)** по классификации Б.Л. Дзержеевского [17, 18]. Календарь последовательной смены ЭЦМ ведётся с 1899 г. и ежегодно обновляется в лаборатории климатологии Института географии РАН [18]. Ежемесячные данные по ЭЦМ получены на сайте [19]. В работе анализировались

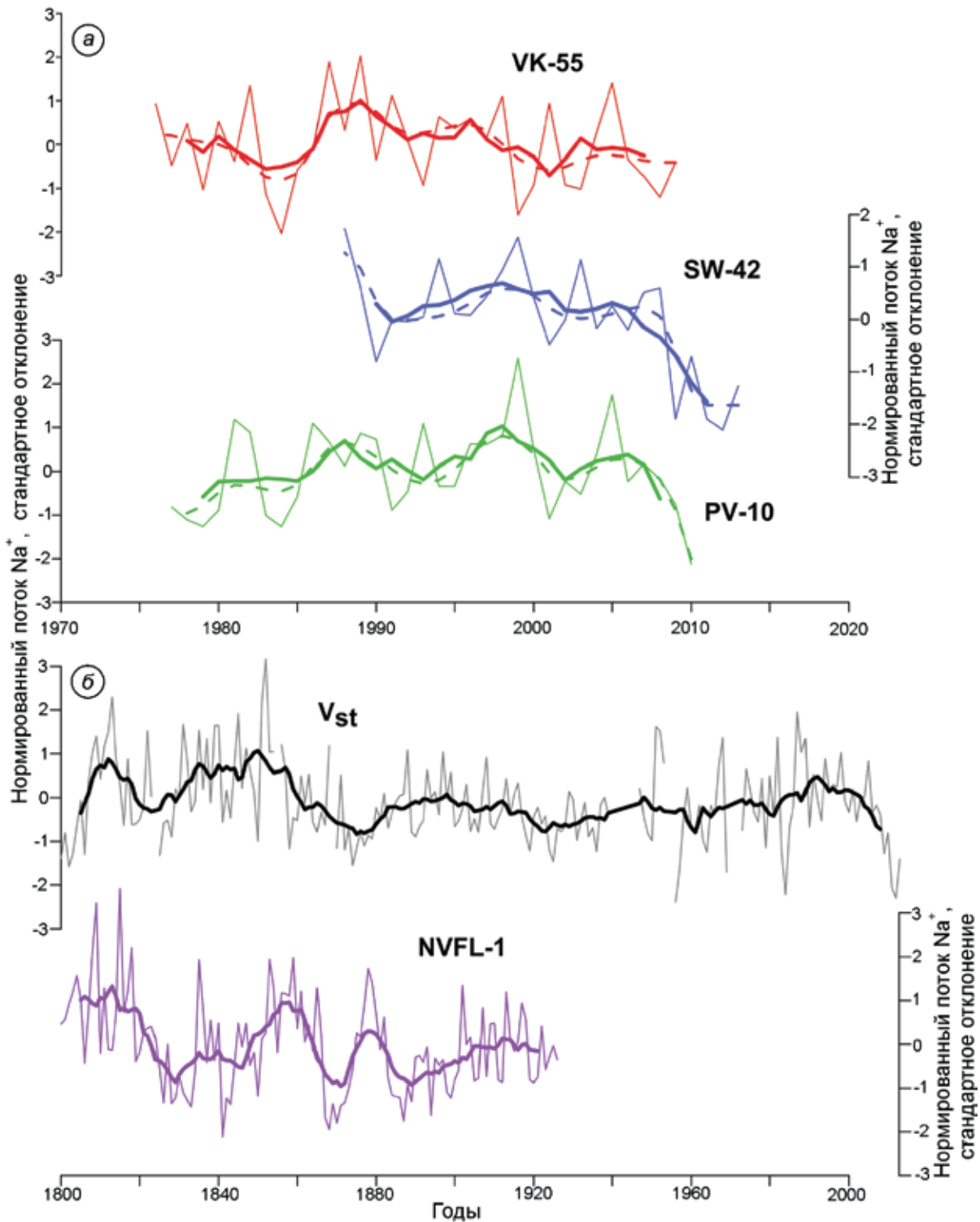


Рис. 2. Нормированные межгодовые изменения потоков Na^+ (годовое осреднение) в трёх коротких (а) и в двух длинных (б) разрезах.

Жирные линии – пятилетние (VK-55, SW-42 и PV-10) и 11-летние (V_{st} и NVFL-1) скользящие средние, прерывистые линии – ряды, сглаженные фильтром 4253H

Fig. 2. Normalized annually averaged Na^+ fluxes in three short (a) and two long (b) cores.

Bold lines are 5-year (VK-55, SW-42 and PV-10) and 11-year (V_{st} and NVFL-1) moving averages; broken lines are values smoothed by 4253H filter

данные по восьми ЭЦМ, относящимся к четырём группам циркуляции: а) зональной (1а, 2а); б) нарушения зональности (4а, 7бл); в) меридиональной северной (9а и 12а); г) меридиональной южной (13з и 13л). Основываясь на заключении о сопряжённости циркуляционных процессов в Северном и Южном полушариях [20, 21], анализировались данные о группах циркуляции для Сибирского сектора, который соответствует сектору Восточной Антарктиды (60–120° в.д.).

Результаты исследований

Пространственно-временное распределение Na^+ в снежно-фирновом покрове. Среднее содержание морского аэрозоля Na^+ в коротких разрезах закономерно уменьшается по мере удаления от океана с 87 ± 30 ppb (PV-10) до 14 ± 5 ppb (VK-55). Поскольку при этом значительно уменьшается и амплитуда межгодовых колебаний, многолетние ряды потоков натрия (Na_f^+) в разных районах Восточной Антарктиды удобнее представить в виде нормированных значений (рис. 2). Динамика Na_f^+ в коротких рядах, охватывающих период 1976–2013 гг., показана на рис. 2, а, а результаты корреляции – в табл. 3. Межгодовые изменения Na_f^+ на станции Восток (VK-55) слабо связаны с двумя другими районами – SW-42 и PV-10 (коэффициенты корреляции –0,04 и 0,18 при n равном 22 и 33 соответственно). Однако между SW-42 и PV-10 связь более сильная (корреляция 0,44, $n = 23$). Вероятно, это объясняется присутствием «шума», обусловленного локальными особенностями аккумуляции на станции Восток. Для подавления высокочастотного сигнала проведено сглаживание рядов. После сглаживания пятилетним скользящим средним корреляция PV-10 с рядами VK-55 и SW-42 увеличилась (0,29 и 0,78 соответственно), однако связь между VK-55 и SW-42 так и не проявилась. После использования более мощного фильтра 4253H (преобразование, состоящее из нескольких последовательных сглаживаний скользящим средним/медианой) обнаружены статистически значимые положительные корреляции между всеми тремя рядами Na_f^+ (коэффициенты корреляции от 0,35 до 0,92). Таким образом, поступление морского аэрозоля в район станции Восток

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между несглаженными и сглаженными (пятилетним скользящим средним и фильтром 4253H) рядами потоков и концентрации Na^+

Показатели	VK-55	SW-42	PV-10
VK-55*			
SW-42*	–0,04/–0,09/0,51		
PV-10*	0,18/0,29/0,35	0,44/0,78/0,92	
Аккумуляция**	0,00/– 0,44		0,05/–0,32

*Корреляция с потоками Na^+ (несглаженные/пятилетнее скользящее среднее/фильтр 4253H); **корреляция с концентрацией Na^+ (несглаженные/пятилетнее скользящее среднее). Жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции (95%-й уровень достоверности).

(пункты SW-42 и PV-10), по крайней мере с середины 1970-х годов, определялось в общих чертах одним природным механизмом – атмосферной циркуляцией. В сглаженных рядах VK-55 и PV-10 прослеживается восьмилетняя периодичность с положительными аномалиями в 1986–1991, 1995–2001 и 2004–2007 гг.

Связь между концентрацией Na^+ в снежно-фирновом покрове и аккумуляцией изучалась на примере двух разрезов – VK-55 (станция Восток) и PV-10 (см. табл. 3). В первом случае использованы данные речных измерений на снегомерном полигоне (средние значения аккумуляции на площади 1 км²), во втором – непосредственный подсчёт по сезонным пикам Na^+ . После сглаживания в VK-55 наблюдается уменьшение концентрации при увеличении скорости аккумуляции, что свидетельствует о влиянии «эффекта разбавления» концентрации в районах с большой долей «сухого осаждения» аэрозоля (т.е. непосредственное осаждение на поверхность снежного покрова). Для пункта PV-10 (400 км от берега по трассе станция Прогресс – станция Восток) связь между концентрацией Na^+ и аккумуляцией менее выражена из-за большего влияния «влажного осаждения» (с атмосферными осадками).

Несмотря на слабую, хотя и статистически значимую корреляцию между сглаженными (11-летнее скользящее среднее) рядами V_{st} и NVFL-1 (коэффициент корреляции 0,20, $n = 122$) интенсивность аккумуляции морского аэрозоля в обоих пунктах была весьма схожей, по крайней мере в 1800–1870 гг. За последние 200 лет положительные аномалии потоков Na^+ в район станции Восток имели место в 1805–1820,

Таблица 4. Значимые (при 95%-м уровне достоверности) коэффициенты корреляции между сглаженными по пятилетиям рядами Na^+ , индексами циркуляции* и продолжительностью ЭЦМ**

Ряд	ААО	ЮПК (30–65° с.ш.)			PDO	SOI	MEI	ЭЦМ
		60° в.д.	90° в.д.	120° в.д.				
VK-55	-/-0,46/ -/-0,56/- (1979–2009)	-/-/ 0,41/-/- (1976–2009)	0,45/-/ -0,37/-/- (1976–2009)	-/-/ -0,36/0,38/- (1976–2009)	-0,45/-/ 0,36/-/- (1976–2009)	-/-/ 0,39/-/- (1976–2009)	-/-/ -/-/- (1976–2009)	0,71 (1a), -0,41 (9a), 0,42 (133), 0,50 (13n) (1976–2009)
SW-42	-/-/ -0,63/-/- (1988–2013)	0,70/0,78/ 0,63/0,60/0,86 (1988–2013)	0,54/0,66/ 0,66/0,55/0,60 (1988–2013)	-0,66/-/ -0,46/-0,70/-0,59 (1988–2013)	0,77/0,86/ 0,67/0,56/0,73 (1988–2013)	-0,49/-0,58/ -0,55/-0,62/-0,53 (1988–2013)	0,50/0,47/ 0,60/0,57/0,49 (1988–2013)	-0,79 (12a), 0,49 (133), 0,69 (13n) (1988–2011)
PV-10	0,52/0,60/ -/-0,48 (1979–2010)	0,58/0,60/ 0,53/0,38/0,60 (1977–2010)	0,44/0,67/ 0,49/-/0,49 (1977–2010)	0,39/0,37/ -/-/- (1977–2010)	-/-/ -/-0,44/- (1977–2010)	0,38/-/ -0,51/- (1977–2010)	-0,38/-/ -/-0,40/- (1977–2010)	-0,53 (2a), -0,49 (76n), -0,64 (4a), 0,58 (133), 0,57 (13n) (1977–2010)
V_{st}	-/-/ -0,56/-0,51/- (1979–2013)	0,27/0,36/ 0,42/0,34/0,33 (1949–2013)	-0,30/ 0,39/0,40/0,31 (1949–2013)	-/-/ 0,26/0,26/- (1949–2013)	0,38/0,42/ 0,51/0,36/0,41 (1948–2013)	-0,52/-0,58/ -0,57/-0,46/-0,49 (1951–2013)	0,44/0,40/ 0,41/0,50/0,43 (1950–2013)	-0,20 (2a), -0,23 (76n), 0,33 (133), 0,45 (13n) (1899–2013)
NVFL-1								0,43 (9a), -0,81 (133) (1899–1926)

*Максимальные значения ежемесячных коэффициентов корреляции по сезонам (лето/осень/зима/весна/год) (в скобках указан период сравнения, годы); **годовые значения продолжительности ЭЦМ.

1830–1860 и 1985–2000 гг., а на куполе Б (NVFL-1) – в 1805–1825, 1850–1865, 1875–1885 и 1910–1920 гг. Таким образом, наиболее интенсивное поступление морского аэрозоля в первой половине XIX в. было характерно для континентальных районов Восточной Антарктиды за последние 200 лет. Межгодовые колебания Na^+ в длинных рядах (V_{st} и NVFL-1) довольно значительны, при этом прослеживается слабый тренд уменьшения поступления морского аэрозоля в район станции Восток (см. рис. 2, б). Спектральный анализ выявил в V_{st} наличие выраженной 95-, 34- и 17-летней, а в NVFL-1 – 52- и 29-летней периодичности.

Связь поступления Na^+ с индексами циркуляции и частотой ЭЦМ. Результаты корреляционного анализа (с сезонным осреднением) между сглаженными по пятилетиям рядами потоков Na^+ и циркуляционными индексами приведены в табл. 4.

Индекс ААО. Значимая положительная корреляция (r от 0,48 до 0,60) обнаружена только с PV-10 (лето и осень). Наличие такой связи показывает, что при усилении зональной циркуляции в Южном полушарии в летне-осенний период поступление Na^+ в район PV-10 увеличивается.

Индекс ЮПК. Хорошо выраженные положительные связи (r от 0,26 до 0,86) между потоками Na^+ и индексом ЮПК обнаружены для SW-42, PV-10 и V_{st} практически для всех сезонов (для VK-55 только зимой и летом). Наиболее сильные связи наблюдаются с индексами, рассчитанными для 60–90° в.д., что свидетельствует о более сильном влиянии атмосферной циркуляции в западной и центральной частях Индийского океана на перенос морского аэрозоля.

Индекс PDO. Значимая положительная корреляция между переносом аэрозоля и индексом PDO установлена для SW-42 и сводного ряда V_{st} во все сезоны (для VK-55 только зимой). Это свидетельствует об удалённом влиянии колебаний температуры поверхности Тихого океана (к северу от 20° с.ш.) на перенос Na^+ во внутриконтинентальные районы Антарктиды (особенно в зимний сезон Южного полушария).

Индекс SOI. Значимые положительные корреляции установлены с VK-55 (зима) и PV-10 (весна, лето), а отрицательные – с SW-42 и V_{st} (во все сезоны), т.е. при развитии положительной аномалии атмосферного давления на востоке тропической зоны Тихого океана наблюдает-

ся либо уменьшение аккумуляции Na^+ (SW-42), либо её увеличение (PV-10). Механизм данной связи до конца не ясен, хотя наличие аналогичной связи с летними температурами в Центральной Антарктике отмечалось ранее [22].

Индекс MEI. Значимая положительная корреляция индекса отмечается для SW-42 и V_{st} во все сезоны, что показывает связь явлений Эль-Ниньо с увеличением интенсивности переноса морского аэрозоля во внутренние районы Антарктиды.

ЭЦМ. Значимая положительная корреляция обнаружена между VK-55 и ЭЦМ 1a (группа зональной циркуляции). Положительная связь с ЭЦМ 9a (группа меридиональной северной циркуляции с двумя прорывами циклонов из низких широт в высокие вдоль западных берегов Южной Америки и Австралии по направлению к Антарктиде) установлена для NVFL-1 (Купол Б, 1899–1926 гг.). Характерно, что высокие корреляции

отмечаются между аккумуляцией Na^+ во всех пунктах (кроме NVFL-1) и группой ЭЦМ с циклонической циркуляцией на полюсе (ЭЦМ 13з и 13л). При этом связь с зимним типом циркуляции в Южном полушарии (ЭЦМ 13л) сильнее для более континентальных районов (станция Восток, SW-42). Таким образом, увеличению переноса морского аэрозоля во внутренние районы Антарктиды способствуют циркуляционные процессы с циклонической циркуляцией на полюсе с выходом от двух (зимой) до четырёх (летом) циклонов из низких широт в высокие.

Связь аккумуляции Na^+ с полем давления Южного полушария. Для выявления пространственных особенностей отклика атмосферной циркуляции на перенос Na^+ проанализированы пространственные корреляции между потоками Na^+ и полем приземного давления Южного полушария с использованием ежемесячных данных реанализа NCEP/NCAR. На рис. 3 по-

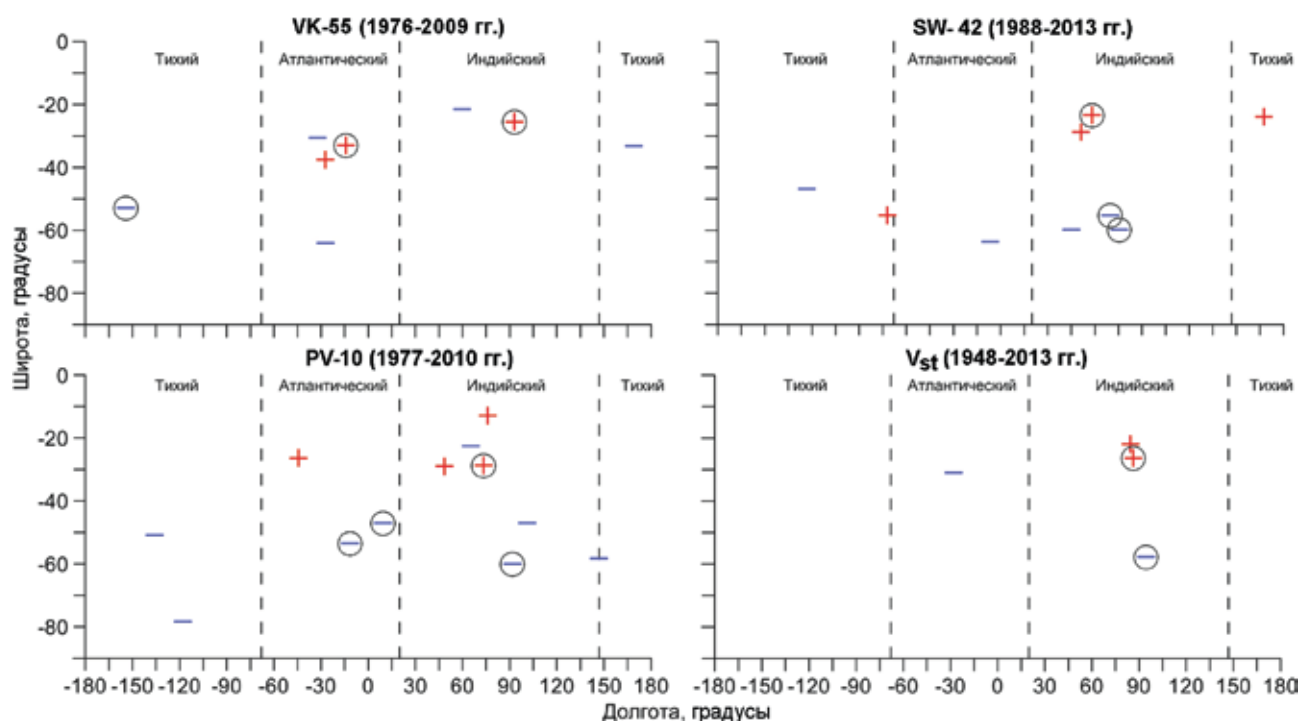


Рис. 3. Географическое положение областей статистически значимой корреляции между временными рядами потоков Na^+ (в скобках указаны периоды времени, для которых рассчитывались коэффициенты корреляции) и приземным полем давления Южного полушария.

Показаны положительные (плюсы) и отрицательные (минусы) корреляции; наиболее сильные корреляции обведены кружком; вертикальные прерывистые линии – границы океанов

Fig. 3. Geographic locations of areas of significant correlations between Na^+ fluxes (periods for which the correlation coefficients were calculated are in parentheses) and sea level pressure (Southern Hemisphere).

Positive (plus) and negative (minus) correlations are presented; the strongest correlations are circled; vertical dashed lines are ocean boundaries

казано географическое распределение областей статистически значимых корреляций. Видно, что наибольшее влияние на интенсивность аэрозольного транспорта оказывают центры действия атмосферы (ЦДА) субтропического (антициклонические) и умеренного (циклонические) поясов. Для VK-55 отмечены наиболее выраженные различия в пространственной корреляции: сильные отрицательные корреляции отмечаются с южно-тихоокеанской депрессией (летом), а сильные положительные – с южно-атлантическим (зимой) и южно-индийским (летом) максимумами. Таким образом, усиление циклонических и антициклонических ЦДА способствует интенсификации переноса морского аэрозоля.

Пространственные корреляции SW-42 с барическим полем Южного полушария более сильные (по сравнению с VK-55) и приурочены главным образом к Индийскому океану: наиболее сильные корреляции с южно-индийским циклоном (летом и зимой) и антициклоном (летом). Для сводного (1948–2013 гг.) ряда V_{st} наибольшая корреляция установлена с антициклоническим и циклоническим ЦДА Индийского океана. Области максимальной пространственной корреляции PV-10 расположены в основном в умеренных широтах. Наиболее сильные отрицательные связи установлены с циклоническими областями на юге Индийского (летом) и Атлантического (зимой и весной) океанов, а положительная связь – с субтропиками Индийского океана. В весенний период области корреляции PV-10 достаточно равномерно распределены в умеренных широтах всех трёх океанов. В целом, в отличие от континентальных районов (станция Восток), для PV-10 характерны более близкие связи с ЦДА умеренных и субполярных широт.

Результаты пространственного корреляционного анализа позволили установить наиболее вероятные источники поступления океанической влаги/аэрозоля во внутренние районы Восточной Антарктиды: в PV-10 – с циклонами кergеленской и западноавстралийской ветвей (Индийский океан), а также южноафриканской ветви (Атлантический океан); в район станции Восток (VK-55 и SW-42) – с циклонами новозеландской (Тихий океан), тасманской и западноавстралийской (Индийский океан), а также южноафриканской ветвей (Атлантический океан).

Реконструкция интенсивности атмосферной циркуляции в индоокеанском секторе Восточной Антарктиды за последние 200 лет. Наличие статистически значимой связи (коэффициент регрессии 0,52), установленной между аккумуляцией Na^+ в районе исследования и интенсивностью атмосферной циркуляции в индоокеанском секторе Южного полушария (индекс ЮПК) по данным реанализа (1948–2013 гг.), позволяет с некоторой долей приближения реконструировать многолетнюю динамику циркуляции и за более длительный период. Изменения индекса ЮПК (для 60° в.д.) как количественного показателя интенсивности атмосферной циркуляции были реконструированы за 200-летний период (рис. 4). Исходными параметрами служили данные по годовой аккумуляции Na^+ в районе станции Восток (сводный ряд V_{st}). Ряд V_{st} значимо коррелирует с ЦДА южной части Индийского океана (см. выше), поэтому его использование позволяет восстановить многолетние изменения атмосферной циркуляции в этом секторе полушария.

За последние 200 лет интенсивность циркуляции демонстрирует квазициклические колебания с 40-летним периодом. Выделяются пять периодов максимальной интенсивности циркуляции, сопровождающейся увеличением потока морского аэрозоля в район станции Восток: в 1805–1820, 1830–1860, 1890–1900, 1940–1950 и 1980–2000 гг. Рост интенсивности циркуляции в первой половине XIX в. (первые два периода) хорошо выражен и совпадает с заключительной фазой малого ледникового периода (~1400–1850 гг.). Пики максимальной интенсивности циркуляции (до $2,5\sigma$) наблюдались в 1810-х и 1850-х годах. Последующие два периода с положительными аномалиями были менее продолжительными и характеризовались более умеренной циркуляцией (до $0,8\sigma$ в середине XX в.). В последний период (1980–2000 гг.) интенсивность циркуляции была более высокой (до $1,2\sigma$), чем в два предыдущих периода. Из рис. 4 видно, что реконструированный индекс ЮПК хорошо коррелирует со сглаженными индексами PDO ($r = 0,59$), MEI ($r = 0,60$), SOI ($r = -0,57$), а также с продолжительностью ЭЦМ $I3z$ ($r = 0,58$) и ЭЦМ $I3l$ ($r = 0,66$). Отметим, что изменения интенсивности атмосферной циркуляции в индоокеанском секторе Восточной Антарктиды в XX в. совпадают со сменой циркуляционных эпох в сибирском секторе Северного полушария [23]:

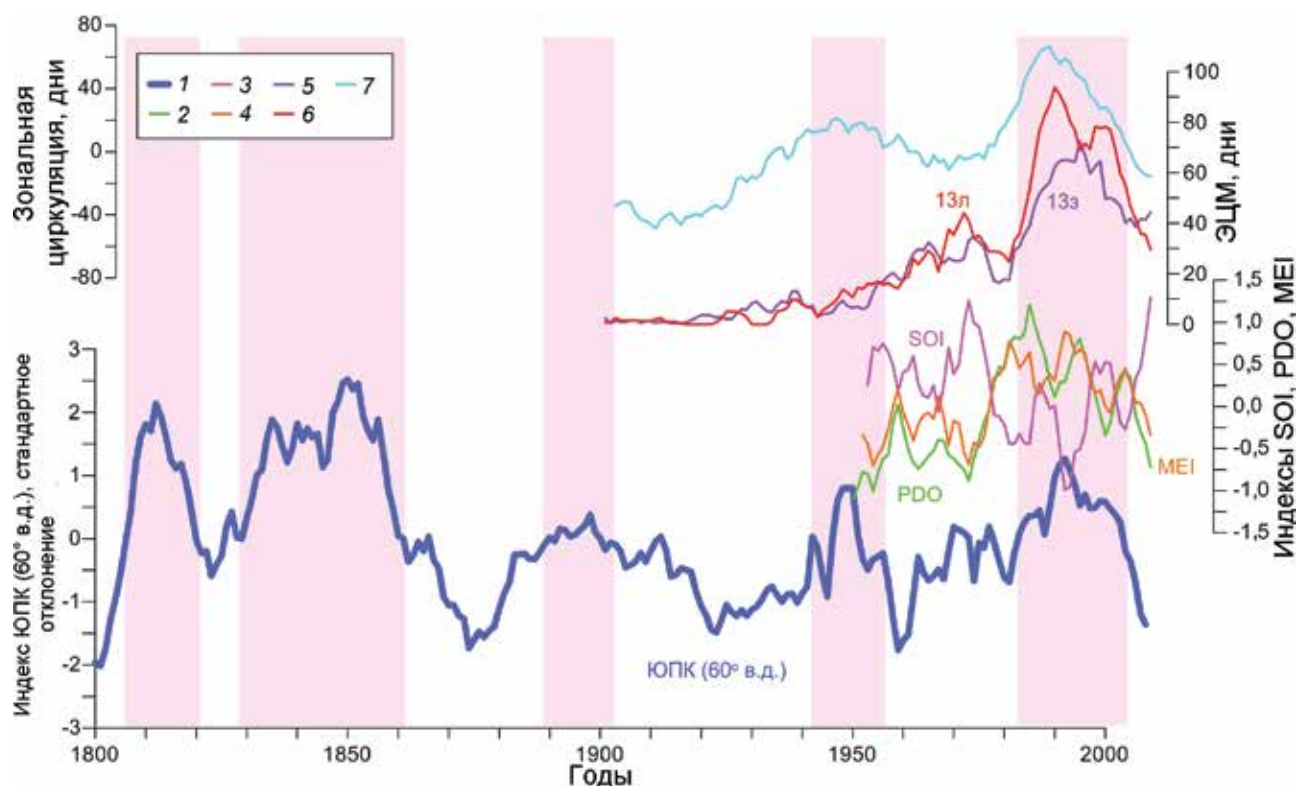


Рис. 4. Изменения климатических индексов за период 1800–2013 гг.:

1 – реконструированный индекс ЮПК (для 60° в.д.); 2 – индекс PDO; 3 – индекс SOI; 4 – индекс MEI; 5 – годовая продолжительность ЭЦМ 13з; 6 – годовая продолжительность ЭЦМ 13л; 7 – отклонения общей продолжительности широтной группы циркуляции в сибирском секторе Северного полушария.

Красные вертикальные полосы отмечают максимальную интенсивность атмосферной циркуляции; ряды индекса ЮПК и продолжительности широтной группы циркуляции представлены 11-летними скользящими средними, остальные – пятилетними скользящими средними

Fig. 4. Climate changes during 1800–2013 AD:

1 – reconstructed SPO (South Polar Oscillation) index for 60° E; 2 – PDO index; 3 – SOI index; 4 – MEI index; 5 – annual duration of ECM 13з; 6 – annual duration of ECM 13л; 7 – deviations of total zonal circulation group duration in Siberian sector of Northern Hemisphere.

The red vertical bands show the periods of increased atmospheric circulation intensity. The SPO and total zonal circulation time series are represented by 11-year running means and other ones by 5-year running means

усиление интенсивности циркуляции над индоокеанским сектором Восточной Антарктиды соответствует двум зональным циркуляционным эпохам (1935–1962 и 1977–2005 гг.).

Обсуждение результатов

В результате многочисленных исследований, проведённых в разных (главным образом прибрежных) частях Антарктиды, установлено, что изменение содержания Na^+ в снежно-фирновом покрове – хороший индикатор динамики атмосферной циркуляции [24, 25 и др.]. Полученные нами данные подтверждают этот общий вывод,

однако в аккумуляции Na^+ в районе исследования установлен ряд пространственно-временных неоднородностей (например, различия между VK-55, SW-42 и PV-10), которые можно объяснить влиянием макроциркуляционных механизмов в атмосфере Южного полушария.

К ключевым факторам, контролирующим интенсивность переноса морского аэрозоля во внутриконтинентальные районы, относятся расположение и интенсивность основных центров действия атмосферы (ЦДА) Южного полушария. Так, с середины 1970-х годов на перенос аэрозоля в район станции Восток (VK-55) определяющее влияние оказывал Южно-Тихоокеанский циклонический ЦДА, а в районы SW-42 и PV-10 – Южно-Индий-

ский и Южно-Атлантический. Однако в рамках более продолжительного временного интервала (1948–2013 гг.) влияние Южно-Индийского ЦДА на район станции Восток всё-таки доминировало. Возможно, такая временная неоднородность свидетельствует о перестройке атмосферной циркуляции в 1970-х годах. В работе [26] при сравнении сводных рядов температуры воздуха и скорости снегонакопления на станции Восток с индексами циркуляции Южного полушария обнаружена смена знака корреляции в 1970-х годах. Резкие климатические изменения в различных регионах Земли в этот же период описаны в ряде публикаций [27, 28].

Комплексное влияние ЦДА по-разному проявляется в районе исследований. Например, различия в изменении потоков Na^+ в VK-55 и SW-42 можно объяснить наличием более тесной связи VK-55 с Южно-Тихоокеанским ЦДА. Ранее было показано [29], что интенсивность атмосферной циркуляции в Тихом океане изменяется по своим законам и не зависит от циркуляции в индоокеанском и атлантическом секторах, тогда как усиление или ослабление циркуляции в ЦДА Индийского и Атлантического океанов происходят почти синхронно. Кроме того, неоднородности потоков Na^+ в районе станции Восток можно объяснить её расположением в области влияния как индоокеанской, так и тихоокеанской воздушных масс, источники которых – разные циклонические ЦДА. Вероятно, с этим связано существование прямо противоположных оценок при определении источников влаги, поступающей в район станции Восток. Согласно [30], аккумуляция здесь отрицательно коррелирует с давлением воздуха в тихоокеанском секторе и положительно – в индийском секторе, что свидетельствует в пользу питания осадками тихоокеанского сектора. По результатам моделирования [31], доминирующий источник влаги для станции Восток – субтропические и умеренные области (~38–52° ю.ш.) Индийского океана.

Недавние исследования [32] показали, что минимальные значения изотопного состава снега характерны для района, расположенного к юго-западу от станции Восток (где находится пункт SW-42), из этого следует, что сама станция входит в зону влияния Индийского океана. По результатам наших исследований, оба океана могут быть источниками поступления влаги и морского аэрозоля, однако их относительный вклад может меняться под действием атмосферной динамики. При

этом следует иметь в виду, что во внутриконтинентальных районах Антарктиды часть морского аэрозоля аккумулируется на снежную поверхность без участия атмосферных осадков (так называемым «сухим осаждением»), поэтому перенос влаги может быть и не связан с переносом аэрозоля. По некоторым оценкам [33], доля «сухого осаждения» во внутренних районах Восточной Антарктиды может достигать 60%.

Ещё одна возможная причина пространственной неоднородности аккумуляции Na^+ – сезонная перестройка атмосферной циркуляции. Считается, что из-за повышенной штормовой деятельности максимальная концентрация натрия в снежном покрове Антарктиды обычно наблюдается в зимний период [34]. Однако наши исследования показали наличие дифференцированного влияния фактора сезонности на различные районы Восточной Антарктиды. Так, аккумуляция Na^+ в районе SW-42 и PV-10 более тесно связана с летне-осенней циркуляцией (см. индекс ЮПК в табл. 4), а в районе VK-55 – с зимней. К сожалению, экстремально низкая скорость аккумуляции в районе станции Восток не позволяет проследить изменения аккумуляции Na^+ с сезонным разрешением, что затрудняет объяснение механизмов подобного сезонного влияния.

Выявленные периодические колебания потоков Na^+ в VK-55, SW-42 и PV-10 хорошо согласуются с динамикой так называемого циркумполярного вихря (ЦПВ), центр которого располагается над Восточной Антарктидой. Ранее было установлено [35], что в изменениях значений геопотенциала ЦПВ от начала 1960-х к началу 1990-х годов хорошо прослеживаются положительная трендовая составляющая и колебание с периодом около восьми лет. Возможно, установленная восьмилетняя периодичность в аккумуляции морского аэрозоля может отражать динамику интенсивности данного макроциркуляционного механизма, что должно стать предметом более детальных исследований.

Синхронность изменения интенсивности атмосферной циркуляции в индоокеанском секторе Южного полушария с сибирским сектором Северного полушария подтверждает вывод о сопряжённости макроциркуляционных механизмов в обоих полушариях [20, 36]. Отметим, что в Сибирском секторе смена меридиональной циркуляционной эпохи имела место именно в середине 1970-х годов [23]. Вероятно, смена цирку-

ляционного режима произошла из-за смещения траекторий циклонов и изменения мощности антициклонов от одной циркуляционной эпохи к другой, вызванных перестройкой климатической системы в этот период в целом.

По нашим данным (см. табл. 4 и рис. 4), интенсивность переноса морского аэрозоля во все исследованные пункты Восточной Антарктиды усиливается при увеличении продолжительности ЭЦМ с циклонической циркуляцией на полюсе (13з и 13л). Механизм такой связи можно связать с перемещением циклонов из низких широт в высокие (район Восточной Антарктиды) по нескольким (летом – три, зимой – один) траекториям (мадагаскарской, западноавстралийской и новозеландской). Особенности таких циклонов – большая скорость перемещения, наличие атмосферных фронтов с волновыми возмущениями и большие суммы осадков, выпадающих за короткое время. В транспортировке морского аэрозоля на материк, видимо, участвуют регенерирующие циклоны, перемещающиеся из умеренных широт в высокие летом и зимой. Углубление таких циклонов влечёт за собой увеличение интенсивности циркуляции воздушных масс и приводит к усилению адвекции тепла [36].

За последние 200 лет максимальная интенсивность атмосферной циркуляции (и соответственно перенос морских аэрозолей в глубь континента) в индоокеанском секторе наблюдалась в первой половине XIX в., что соответствует заключительному этапу глобального похолодания малого ледникового периода (~1400–1850 гг.). Подобное усиление атмосферной циркуляции и скоростей ветра во время малого ледникового периода были установлены для Западной Антарктиды [34]. Увеличение интенсивности атмосферной циркуляции во время финальной фазы малого ледникового периода связано с комплексной перестройкой всей климатической системы Земли (изменение температурных градиентов между океаном и сушей, океанической циркуляции, сокращение площадей морских льдов и др.).

Выводы

В результате изучения химического состава снежно-фирнового покрова в трёх пунктах индоокеанского сектора Восточной Антарктиды (вдоль трассы станция Прогресс – станция Восток) вы-

явлены пространственно-временные изменения в аккумуляции морского аэрозоля (Na^+) за период 1976–2013 гг. Было исследовано содержание Na^+ в более глубоких ядрах, полученных на станции Восток (VK-07, VKT-55) и Куполе Б (NVFL-1), построен сводный профиль потока Na^+ в район станции Восток. Спектральный анализ показал наличие 95-, 34- и 17-летней (станции Восток) и 52- и 29-летней (NVFL-1) периодичности в аккумуляции морского аэрозоля. Коротким рядом свойственна восьмилетняя цикличность.

Установлено, что концентрация Na^+ уменьшается с ростом скорости аккумуляции (особенно для района станции Восток), что подтверждает наличие «эффекта разбавления» в районах с большой долей «сухого осаждения». Результаты корреляционного анализа показывают, что межгодовые изменения потока Na^+ в пунктах SW-42 и PV-10 были очень схожими. Анализ более длинных рядов потока Na^+ (станция Восток, Купол Б) выявил синхронные положительные аномалии в первой половине XIX в.

Значимые корреляционные связи отмечаются между аккумуляцией Na^+ и индексами циркуляции (AAO, PDO, SOI, MEI, ЮПК), полем давления Южного полушария, а также частотой ЭЦМ Северного полушария. Пространственно-временные неоднородности аккумуляции морского аэрозоля в различных пунктах района исследований объясняются совокупным воздействием макроциркуляционных механизмов Южного полушария – циклонических и антициклонических Центров действия атмосферы (ЦДА). Для VK-55 наиболее сильная связь обнаружена с Южно-Тихоокеанским ЦДА, а для SW-42, PV-10 и сводного ряда станции Восток – с Южно-Индийским ЦДА. Для континентальных районов установлено наличие дальних связей с Тихоокеанскими климатическими аномалиями (в том числе с Эль-Ниньо), однако механизмы этих связей до конца не ясны.

На основе сводного профиля потока Na^+ (район станции Восток) реконструирована интенсивность атмосферной циркуляции в индоокеанском секторе за последние 200 лет и установлено наличие 40-летней периодичности. Максимумы циркуляционной активности наблюдались в 1805–1820, 1830–1860, 1890–1900, 1940–1950 и 1980–2000 гг. Наиболее интенсивная циркуляция отмечена в первой половине XIX в. (конец малого ледникового периода). Кроме того, подтверждён вывод о синхронности измене-

ний атмосферной циркуляции в индоокеанском секторе Южного полушария и в сибирском секторе Северного полушария.

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников Арктического и Антарктического института В.Я. Липенкова, А.А. Екайкина, Ю.А. Шибаяева за помощь в отборе снежно-фирновых кернов, любезно предоставленные данные по плотности и ценные консультации в ходе подготовки рукописи. Авторы выражают искреннюю благодарность И.А. Немировской и анонимному рецензенту за ценные замечания к первому варианту

рукописи. Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант 15-55-16001-НЦНИЛ).

Acknowledgements. The authors thank V. Lipenkov, A. Ekaykin and Yu. Shibaev from the Arctic and Antarctic Research Institute for help in sampling of snow-firn cores, kindly provided data on snow density and valuable advices during preparation of the manuscript. The authors sincerely thank I.A. Nemirovskaya and an anonymous reviewer for their valuable comments to the first version of the manuscript. The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant 15-55-16001-НЦНИЛ).

Литература

1. *Legrand M., Mayewski P.* Glaciochemistry of polar ice cores: a review // *Reviews of Geophysics*. 1997. V. 35. № 3. P. 219–243. doi: 10.1029/96RG03527.
2. *Екайкин А.А., Липенков В.Я., Кузьмина И.Н.* Реконструкция температуры воздуха и аккумуляции снега в Центральной Антарктиде по результатам изотопных и стратиграфических исследований снежной толщи в шурфах на станции Восток // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2003. Вып. 74. С. 40–65.
3. *Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Kuzmina I.N., Petit J.R., Masson-Delmotte V., Johnsen S.J.* The changes in isotope composition and accumulation of snow at Vostok station, East Antarctica, over the past 200 years // *Annals of Glaciology*. 2004. V. 39. P. 569–575.
4. *Владимирова Д.О., Екайкин А.А., Липенков В.Я.* Изменения климата в индоокеанском секторе Восточной Антарктиды за последние 350 лет // *Лёд и Снег*. 2015. Т. 55. № 4. С. 5–18.
5. *Ekaykin A.A., Vladimirova D.O., Lipenkov V.Y., Masson-Delmotte V.* Climatic variability in Princess Elizabeth Land (East Antarctica) over the last 350 years // *Climate of the Past*. 2017. V. 13. P. 61–71. doi:10.5194/cp-13-61-2017.
6. *Ходжер Т.В., Голобокова Л.П., Осипов Э.Ю., Артемьева О.В., Масленникова М.М., Липенков В.Я., Шибаяев Ю.А., Белозерова О.Ю., Лихошвай Е.В.* Свидетельство вулканических извержений Тамбора и Кракатау (XIX) по данным химического и электронно-микроскопического исследования снежно-фирновых кернов из района станции Восток (Антарктида) // *Лёд и Снег*. 2011. № 1 (113). С. 105–113.
7. *Khodzher T.V., Golobokova L.P., Osipov E.Yu., Shibaev Yu.A., Lipenkov V.Ya., Osipova O.P., Petit J.R.* // Spatial-temporal dynamics of chemical composition of surface snow in East Antarctica along the Progress station – Vostok station transect // *The Cryosphere*. 2014. V. 8. P. 931–939. doi:10.5194/tc-8-931-2014.
8. *Osipov E.Y., Khodzher T.V., Golobokova L.P., Onischuk N.A., Lipenkov V.Y., Ekaykin A.A., Shibaev Y.A., Osipova O.P.* // High-resolution 900 year volcanic and climatic record from the Vostok area,

References

1. *Legrand M., Mayewski P.* Glaciochemistry of polar ice cores: a review. *Reviews of Geophysics*. 1997, 35 (3): 219–243. doi: 10.1029/96RG03527.
2. *Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Kuzmina I.N.* Reconstruction of air temperature and snow accumulation in Central Antarctica based on isotopic and stratigraphic studies of the snow cover in pits at the Vostok station. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2003, 74: 40–65. [In Russian].
3. *Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Kuzmina I.N., Petit J.R., Masson-Delmotte V., Johnsen S.J.* The changes in isotope composition and accumulation of snow at Vostok station, East Antarctica, over the past 200 years. *Annals of Glaciology*. 2004, 39: 569–575.
4. *Vladimirova D.O., Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya.* The variability of climate in Indian Ocean sector of East Antarctica over the past 350 years. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2015, 55 (4): 5–18. [In Russian].
5. *Ekaykin A.A., Vladimirova D.O., Lipenkov V.Y., Masson-Delmotte V.* Climatic variability in Princess Elizabeth Land (East Antarctica) over the last 350 years. *Climate of the Past*. 2017, 13: 61–71. doi:10.5194/cp-13-61-2017.
6. *Khodzher T.V., Golobokova L.P., Osipov E.Yu., Artemyeva O.V., Maslennikova M.M., Lipenkov V.Ya., Shibaev Yu.A., Belozerova O.Yu. Likhoshway E.V.* Evidences of volcanic eruptions of Tambora and Krakatau (XIX) according to chemical and electron microscopy studies of snow-firn cores from Station Vostok (Antarctica). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2011, 1 (113): 105–113. [In Russian].
7. *Khodzher T.V., Golobokova L.P., Osipov E.Yu., Shibaev Yu.A., Lipenkov V.Ya., Osipova O.P., Petit J.R.* Spatial-temporal dynamics of chemical composition of surface snow in East Antarctica along the Progress station – Vostok station transect. *The Cryosphere*. 2014, 8: 931–939. doi:10.5194/tc-8-931-2014.
8. *Osipov E.Y., Khodzher T.V., Golobokova L.P., Onischuk N.A., Lipenkov V.Y., Ekaykin A.A., Shibaev Y.A., Osipova O.P.* High-resolution 900 year volcanic and climatic record from the Vostok area, East Antarctica. *The Cryosphere*. 2014, 8: 843–851. doi:10.5194/tc-8-843-2014.
9. Electronic resource <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>
10. *Mo K.C.* Relationships between low-frequency variability in the Southern Hemisphere and sea surface temperature anomalies. *Journ. of Climate*. 2000, 13: 3599–3610.

- East Antarctica // *The Cryosphere*. 2014. V. 8. P. 843–851. doi:10.5194/tc-8-843-2014.
9. Электронный ресурс <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>
 10. *Mo K.C.* Relationships between low-frequency variability in the Southern Hemisphere and sea surface temperature anomalies // *Journ. of Climate*. 2000. V. 13. P. 3599–3610.
 11. *Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В.* Крупномасштабные колебания циркуляции атмосферы в южном полушарии и их влияние на изменение климата некоторых регионов земного шара в XX веке // *Метеорология и гидрология*. 2007. № 7. С. 5–17.
 12. *Смирнов Н.П., Саруханян Э.И., Розанова И.В.* Циклонические центры действия атмосферы Южного полушария и изменения климата. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2004. 209 с.
 13. *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 // *Bull. of the American Meteorol. Society*. 1996. V. 77. P. 437–471.
 14. *Ropelewski C., Jones P.* An extension of the Tahiti–Darwin Southern Oscillation Index // *Monthly Weather Review*. 1987. V. 115. P. 2161–2165.
 15. *Wolter K., Timlin M.S.* Measuring the strength of ENSO events – how does 1997/98 rank? // *Weather*. 1998. V. 53. P. 315–324. doi: 10.1002/j.1477-8696.1998.tb06408.x.
 16. *Barnett T.P., Pierce D.W., Saravanan R., Shneider N., Dommengot D., Latif M.* Origins of the mid-latitude Pacific decadal variability // *Geophys. Research Letters*. 1999. V. 26. № 10. P. 1453–1456. doi: 10.1029/1999GL900278.
 17. *Дзержевский Б.Л., Курганская В.М., Витвицкая З.М.* Типизация циркуляционных механизмов в северном полушарии и характеристика синоптических сезонов // *Тр. науч.-исслед. учреждений Главного управления гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Сер. 2. Синоптическая метеорология. Вып. 21. Центральный институт прогнозов. М.–Л.: Гидрометеоиздат, 1946. 80 с.*
 18. *Кононова Н.К.* Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзержевскому. М.: изд. Ин-та географии РАН, 2009. 372 с.
 19. Электронный ресурс <http://www.atmospheric-circulation.ru>
 20. *Дзержевский Б.Л.* Сравнение главнейших закономерностей циркуляции атмосферы над Южным и Северным полушариями // *Информ. бюл. Сов. Антаркт. экспедиции*. 1967. № 65. С. 58–68.
 21. *Захаров В.Г., Кононова Н.К.* Глобальная циркуляция атмосферы и сопряжённость гляциологических процессов в Арктике и Антарктике // *Лёд и Снег*. 2010. № 2 (110). С. 127–135.
 22. *Ekaykin A.A., Kozachek A.V., Lipenkov V.Ya., Shibaev Y.A.* Multiple climate shifts in the Southern Hemisphere over the past three centuries based on central Antarctic snow pits and core studies // *Annals of Glaciology*. 2014. V. 55 (66). P. 259–266.
 23. *Кононова Н.К.* Циркуляционные эпохи в секторах Северного полушария в 1899–2014 гг. // *Геополитика и экогеодинамика регионов*. 2015. Т. 1 (11). Вып. 2. С. 56–66.
 11. *Gruza G.V., Ran'kova E.Ya., Rocheva E.V.* Large-scale oscillations of the atmospheric circulation in the southern hemisphere and their influence on climate change in some regions of the globe in the 20th century. *Meteorology and Hydrology*. 2007, 7: 5–17. [In Russian].
 12. *Smirnov N.P., Saruhanyan E.I., Rozanova I.V.* *Tsiklonicheskiye tsentry deystviya atmosfery yuzhnogo polushariya i izmeneniya klimata*. Cyclonic action centres in the atmosphere of the Southern Hemisphere and climatic variations. Sankt-Petersburg: Russian State Hydrometeorological University, 2004: 209 p. [In Russian].
 13. *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. *Bull. American Meteorol. Society*. 1996, 77: 437–471.
 14. *Ropelewski C., Jones P.* An extension of the Tahiti–Darwin Southern Oscillation Index. *Monthly Weather Review*. 1987, 115: 2161–2165.
 15. *Wolter K., Timlin M.S.* Measuring the strength of ENSO events – how does 1997/98 rank? *Weather*. 1998, 53: 315–324. doi: 10.1002/j.1477-8696.1998.tb06408.x.
 16. *Barnett T.P., Pierce D.W., Saravanan R., Shneider N., Dommengot D., Latif M.* Origins of the mid-latitude Pacific decadal variability. *Geophys. Research Letters*. 1999, 26 (10): 1453–1456. doi: 10.1029/1999GL900278.
 17. *Dzherdzeevskii B.L., Kurganskaya V.M., Vitvitskaya Z.M.* *Tipizatsiya tsirkulyatsionnykh mekhanizmov v severnom polusharii i kharakteristika sinopticheskikh sezonov. Trudy nauchno-issledovatel'skikh uchrezhdeniy Glavnogo upravleniya gidrometeorologicheskoy sluzhby pri Sovete Ministrov SSSR. Ser. 2. Sinopticheskaya meteorologiya. Vyp. 21. Tsentral'nyy institut prognozov*. Typing of circulation mechanisms in Northern Hemisphere and characteristic of synoptic seasons. Moscow–Leningrad: Gidrometizdat, 1946: 80 p. [In Russian].
 18. *Kononova N.K.* *Klassifikatsiya tsirkulyatsionnykh mekhanizmov severnogo polushariya po B.L. Dzherdzyevskomu*. Classification of circulation mechanisms of Northern Hemisphere by B.L. Dzherdzeevskiy. Moscow: Institute of Geography, 2009: 372 p. [In Russian].
 19. Electronic resource <http://www.atmospheric-circulation.ru>
 20. *Dzherdzeevskii B.L.* Comparison of major patterns of atmospheric circulation over the Southern and Northern Hemispheres. *Informatsionnyi byulleten' Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii*. Newsletters of Soviet Antarctic expedition. 1967, 65: 58–68. [In Russian].
 21. *Zakharov V.G., Kononova N.K.* Global atmospheric circulation and interlinking of glaciological processes in Arctic and Antarctic. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2010, 2 (110): 127–135. [In Russian].
 22. *Ekaykin A.A., Kozachek A.V., Lipenkov V.Ya., Shibaev Y.A.* Multiple climate shifts in the Southern Hemisphere over the past three centuries based on central Antarctic snow pits and core studies. *Annals of Glaciology*. 2014, 55 (66): 259–266.
 23. *Kononova N.K.* Circulation epochs in sectors of the Northern Hemisphere in the 1899–2014 years. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*. Geopolitics and ecogeodynamics of regions. 2015, 1 (11), issue 2: 56–66. [In Russian].

24. *Kreutz K., Mayewski P.* Spatial variability of Antarctic surface snow glaciochemistry: implications for palaeo-atmospheric circulation reconstructions // *Antarctic Science*. 1999. V. 11 (1). P. 105–118.
25. *Souney J.M., Mayewski P.A., Goodwin, I.D., Meeker L.D., Morgan V., Curran M., van Ommen T.D., Palmer A.S.* A 700-year record of atmospheric circulation developed from the Law Dome ice core, East Antarctica // *Journ. of Geophys. Research*. 2002. V. 107 (D22) P. 1–9. doi: 10.1029/2002JD002104.
26. *Козачек А.В., Екайкин А.А., Липенков В.Я., Шибаетев Ю.А., Вайкмяэ Р.* О связи климатической изменчивости Центральной Антарктиды с климатом средних и низких широт Южного полушария // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2011. Вып. 4 (90). С. 5–13.
27. *Giese B.S., Urizar S.C., Fuckar N.S.* The southern hemisphere origin of the 1976 climate shift // *Geophys. Research Letters*. 2002. V. 29. № 2. P. 1–4. doi: 10.1029/2001GL013268.
28. *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. doi: 10.1007/s00382-003-0321-9.
29. *Воробьев В.Н., Зарин С.А., Рыжаков Л.Ю., Смирнов Н.П.* Многолетняя изменчивость интенсивности зональных и меридиональных переносов воздушных масс и повторяемость форм атмосферной циркуляции в южном полушарии // *Уч. зап. Российского гос. гидрометеорол. ун-та*. 2009. № 9. С. 100–105.
30. *Екайкин А.А., Липенков В.Я., Пети Ж.Р., Массон-Дельмотт В.* 50-летний цикл в изменениях аккумуляции и изотопного состава снега на станции Восток // *МГИ*. 2003. Вып. 94. С. 163–173.
31. *Sodemann H., Stohl A.* Asymmetries in the moisture origin of Antarctic precipitation // *Geophys. Research Letters*. 2009. V. 36. L22803. doi: 10.1029/2009GL040242.
32. *Владимирова Д.О., Екайкин А.А., Липенков В.Я., Попов С.В., Шибаетев Ю.А.* Пространственная изменчивость скорости накопления и изотопного состава снега в индоокеанском секторе Восточной Антарктиды, включая район подледникового озера Восток // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2015. Вып. 1 (103). С. 69–86.
33. *Legrand M.* Chemistry of Antarctic snow and ice // *Journ. de Physique Colloques*. 1987. V. 48. № 3. P. 77–86. doi: 10.1051/jphyscol:1987111.
34. *Kreutz K.J., Mayewski P.A., Meeker L.D., Twickler M.S., Whitlow S.I., Pittalwala I.I.* Bipolar changes in atmospheric circulation during the Little Ice Age // *Science*. 1997. V. 277. № 5330. P. 1294–1296. doi: 10.1126/science.277.5330.1294.
35. *Воробьев В.Н., Рыжаков Л.Ю., Смирнов Н.П.* Динамика тропосферного циркумполярного вихря и формы атмосферной циркуляции южного полушария // *Уч. зап. Российского гос. гидрометеорол. ун-та*. 2006. № 2. С. 20–32.
36. *Астапенко П.Д.* Атмосферные процессы в высоких широтах южного полушария. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 282 с.
24. *Kreutz K., Mayewski P.* Spatial variability of Antarctic surface snow glaciochemistry: implications for palaeo-atmospheric circulation reconstructions. *Antarctic Science*. 1999, 11 (1): 105–118.
25. *Souney J.M., Mayewski P.A., Goodwin, I.D., Meeker L.D., Morgan V., Curran M., van Ommen T.D., Palmer A.S.* A 700-year record of atmospheric circulation developed from the Law Dome ice core, East Antarctica. *Journ. of Geophys. Research*. 2002, 107 (D22): 1–9. doi: 10.1029/2002JD002104.
26. *Kozachek A.V., Ekaykin A.A., Lipenkov V.Y., Shibaev Y.A., Vaikmae R.* On the relationship between climatic variability in central Antarctica and the climate of middle and low latitudes of Southern Hemisphere. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2011, 4 (90): 5–13. [In Russian].
27. *Giese B.S., Urizar S.C., Fuckar N.S.* The southern hemisphere origin of the 1976 climate shift. *Geophys. Research Letters*. 2002, 29 (2): 1–4. doi: 10.1029/2001GL013268.
28. *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, 21: 153–166. doi: 10.1007/s00382-003-0321-9.
29. *Vorobyev V.N., Zarin S.A., Rygakov L.Yu., Smirnov N.P.* Long-term variability of intensity of zonal and meridional air masses transfer and repetition of atmospheric circulation forms in the Southern Hemisphere. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. Scientific notes of the Russian State Hydrometeorol. University. 2009, 9: 100–105. [In Russian].
30. *Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Petit J.R., Masson-Delmotte V.* 50-year cycle in variations of accumulation rate and isotopic composition of snow at Vostok station. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2003, 94: 163–173. [In Russian].
31. *Sodemann H., Stohl A.* Asymmetries in the moisture origin of Antarctic precipitation. *Geophys. Research Letters*. 2009, 36: L22803. doi: 10.1029/2009GL040242.
32. *Vladimirova D.O., Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Popov S.V., Shibaev Yu.A.* Spatial variability of the accumulation rate and isotopic composition of the snow in Indian ocean sector of East Antarctica including the vicinity of subglacial Lake Vostok. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2015, 1 (103): 69–86. [In Russian].
33. *Legrand M.* Chemistry of Antarctic snow and ice. *Journ. de Physique Colloques*. 1987, 48 (3): 77–86. doi: 10.1051/jphyscol:1987111.
34. *Kreutz K.J., Mayewski P.A., Meeker L.D., Twickler M.S., Whitlow S.I., Pittalwala I.I.* Bipolar Changes in atmospheric circulation during the Little Ice Age. *Science*. 1997, 277 (5330): 1294–1296. doi: 10.1126/science.277.5330.1294.
35. *Vorobyev V.N., Ryzhakov L.Yu., Smirnov N.P.* Dynamics of a tropospheric circumpolar vortex and atmospheric circulation forms in the Southern Hemisphere. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2006, 2: 20–32. [In Russian].
36. *Astapenko P.D.* *Atmosfernye protsessy v vysokikh shirootakh yuzhnogo polushariya*. Atmospheric processes in the high latitudes of the Southern Hemisphere. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1960: 282 p. [In Russian].